

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO GEOLOŠKO NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij geološkog inženjerstva

PROCJENA FRAKTALNE DIMENZIJE GORNJOTRIJASKIH DOLOMITA U
ŽUMBERAČKOM GORJU

Diplomski rad

Stanko Miškić

GI – 264

Zagreb, srpanj 2017.

Zahvala...

...mentoru prof. sr. sc. Ivanu Dragičević i asistentu Ivici Pavičić, mag. ing. geol. na predloženoj temi, strpljenju, kritikama i savjetima tijekom izrade diplomskog rada.

...budućoj supruzi Luciji i članovima obitelji na podršci tijekom cijelog diplomskog studija i izrade diplomskog rada.

PROCJENA FRAKTALNE DIMENZIJE GORNJOTRIJASKIH DOLOMITA U
ŽUMBERAČKOM GORJU

STANKO MIŠKIĆ

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za geologiju i geološko inženjerstvo
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

Sažetak

Diplomski rad obrađuje i sadrži detaljan opis geoloških jedinica gornjo trijaskih dolomita Žumberačke gore koji prekrivaju područje istraživanja te opis diskontinuiteta koji utječu na stupanj razlomljenosti okršene stjenske mase te samim time i fraktalne dimenzije koje daju informacije o prostornoj raspodjeli pukotina i dominirajućim setovima pukotina. Fraktalna dimenzija je mjera kojom objekt ispunjava prostor. Analize fraktalne dimenzije su izrađene na temelju interpretacije fotografija fotografiranih na terenu, pomoću računalnog programa *Adobe Illustrator CS6*, a analiza i izračun fraktalne dimenzije je dobiven pomoću računalnog programa *Fractalyse*, metodom "*Box – counting*". Iznos fraktalne dimenzije govori i o stupnju razlomljenosti stjenske mase. U radu su rezultati 1D mjerenja ekstrapolirani na 2D vrijednosti. Niže vrijednosti fraktalne dimenzije ukazuju na veći utjecaj manjeg broja velikih pukotina, dok veće vrijednosti fraktalnih dimenzija ukazuju na ujednačenu raspodjelu većeg broja manjih pukotina.. Glavni izvori podataka su bili magisterij dr. sc. Tončica Grgasović te više znanstvenih članaka s temom primjene fraktala na dolomitima. Fraktalna dimenzija može se koristiti i pri izradi diskretnih modela pukotinskih sustava ako se raspodjela pukotina modelira s „power-law“ raspodjelom.

Ključne riječi: dolomiti, Žumberačka gora, fraktalna dimenzija, setovi diskontinuiteta, prostorna raspodjela, razlomljenost.

Diplomski rad sadrži: 54 stranice, 12 tablica, 32 slike, 13 priloga i 69 referenci.

Jeziki izvornika: hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta
Pierottijeva 6, Zagreb

Voditelj: Dr. sc. Ivan Dragičević, redoviti profesor u trajnom zvanju RGNF
Pomoć pri izradi: Ivica Pavičić, mag. ing. geol., asistent/znanstveni novak RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Ivan Dragičević, redoviti profesor u trajnom zvanju RGNF
Dr. sc. Davor Pavelić, redoviti profesor u trajnom zvanju RGNF
Dr. sc. Željko Duić, docent RGNF

Datum obrane: 7. srpnja, 2017.

University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology
and Petroleum Engineering

Master's Thesis

ESTIMATION OF FRACTAL DIMENSION IN UPPER TRIASSIC DOLOMITE OF ŽUMBERAK MOUNTAIN

STANKO MIŠKIĆ

Thesis completed in: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum engineering
Institute of geology and Geological engineering,
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

This Master thesis deals and contains a detailed description of the geological units from upper Triassic dolomites of Žumberak Mountain that cover the research area. It contains the description of discontinuity sets which affect on the degree of fragmentation on the karstified rock mass and thus on the fractal dimensions that give the information about the spatial distribution of fractures and dominating fracture sets. Fractal dimension is a measure of how fractures fill the space. Analysis of fractal dimensions are based on interpretation of taken photos on the field. The interpretation is made by a software *Adobe Illustrator CS6*, but the analysis and values of fractal dimension are obtained by a software *Fractalyse*, with a method '*Box – counting*'. The value of fractal dimension tells about the degree of fragmentation on the rock mass too. In the thesis the results of 1D measurements are extrapolated into 2D values. Lower values of fractal dimension indicate smaller number of fractures and higher significance of larger fractures while higher values indicate distribution of more similar sized fractures throughout whole outcrop. The main sources of data were the master's Degree from PhD Tonči Grgasović and more scientific articles with a topic about the application of fractals on dolomites. Fractal dimension can be used in Discrete Fracture Network modelling if spatial distribution of fractures is represented with power law distribution.

Keywords: dolomites, Žumberak Mountain, fractal dimension, set of discontinuities, spatial distribution, fragmentation.

Thesis contains: 54 pages, 12 tables, 32 figures, 14 enclosures and 69 references.

Original in: Croatian

Thesis deposited in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering,
Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: PhD Ivan Dragičević, Tenured Professor
Technical support and assistance: Ivica Pavičić, M. Sc., Assistant
Reviewers: PhD Ivan Dragičević, Tenured Professor
PhD Davor Pavelić, Tenured Professor
PhD Željko Duić, Assistant Professor

Date of defense: July 07, 2017.

SADRŽAJ:

1. UVOD.....	1
2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA	4
3. GEOGRAFSKA, GEOMORFOLOŠKA I KLIMATSKA OBILJEŽJA ISTRAŽIVANOG PODRUČJA.....	6
3.1. Geografske i geomorfološke značajke.....	6
3.2. Klimatske značajke.....	7
4. GEOLOŠKE ZNAČAJKE ISTRAŽIVANOG PODRUČJA	9
4.1. Geološke značajke značajke	11
4.1.1. Mezozoik.....	11
4.2. Strukturno – tektonske značajke.....	17
5. FRAKTALNA GEOMETRIJA I POVEZANOST FRAKTALA S GEOLOGIJOM	20
5.1. Definicija fraktala i koncept Hausdorffove fraktalne dimenzije	21
5.1.1. Fragmentacija i fragmentacijski modeli.....	22
5.1.2. Fraktalna raspodjela i dimenzija rasjednih pukotina i pukotinskih sustava	25
6. PROCJENA FRAKTALNE DIMENZIJE GORNJOTRIJASKIH DOLOMITA ŽUMBERAČKOG GORJA	27
6.1. Postupak obrade fotografija.....	27
6.2. Metode mjerenja fraktalne dimenzije	31
6.2.1. Metode brojanja.....	32
6.3. Izračun fraktalnih dimenzija pukotinskih sustava na gornjotrijaskim dolomitima Žumberka	36
6.3.1. Točka 48.....	38
6.3.2. Točka 36.....	42
6.3.3. Točka 50.....	45

6.3.4.	Točka 51	48
6.3.5.	Točka 55	51
7.	ZAKLJUČAK.....	54

POPIS SLIKA:

Slika 1-1. Karta površinskog rasprostranjenja karbonatnih stijena u svijetu (http://web.env.auckland.ac.nz/our_research/karst/#karst1).	1
Slika 1-2. Prikaz rasprostranjenosti krša na području Republike Hrvatske. (HERAK, 1991).	2
Slika 3-1. Geografski položaj istraživnog područja i Žumberačke gore (Google karte)....	6
Slika 4-1. Geološka građa istraživnog i šireg područja sa lokacijama (točkama) fotografiranih izdanaka (PAVIČIĆ in prep.).....	10
Slika 4-2. Debeloslojeni srednjotrijaski stromatolitni dolomiti (lokalitet: Puškarov jarak).	12
Slika 4-3. Stromatolitne lamine u srednjotrijaskim dolomitima (lokalitet Puškarov jarak).	13
Slika 4-4. Odnosi između rasjedno - boranih i horizontalnih mehanizama Žumberačke gore i dijela Savske doline (PRTOLJAN, 2001).	18
Slika 5-1. Idealizirani model fraktalne fragmentacije (TURCOTTE, 1997).....	23
Slika 5-2. Karte pukotinskog sklopa u Hornelen bazenu (Norveška) (DAVY et al., 2006) .	25
Slika 6-1. Usporedba fotografije izdanka i digitaliziranih trasa pukotina (GUREL et al., 2016).....	28
Slika 6-2. Dijagram dobivanja fraktalne dimenzije (fractalyse.org).	31
Slika 6-3. Mjerenje paprati "Grid" metodom (wahl.org).	32
Slika 6-4. Fraktalna analiza "Box - counting" metodom (wahl.org).	33
Slika 6-5. Fraktalna analiza metodom "Radius mass" (wahl.org).	34
Slika 6-6. Fraktalna analiza metodom dilatacije (wahl.org).....	35
Slika 6-7. Sklop diskontinuiteta na gornjotrijaskim dolomitima Žumberka (PAVIČIĆ in prep.).....	36
Slika 6-8. Stereogram svih sustava diskontinuiteta na istraživanim lokacijama.....	37
Slika 6-9. Fotografija izdanka, IMG_1796.....	39
Slika 6-10. Obradena fotografija sa sklopom diskontinuiteta, IMG_1796.....	39
Slika 6-11. Stereogram diskontinuiteta na Točci 48.....	40
Slika 6-12. Fotografija izdanka, IMG_1935 – 1952.....	42
Slika 6-13. Obradena fotografija sa sklopom diskontinuiteta, IMG_1935 – 1952.....	43
Slika 6-14. Stereogram diskontinuiteta na Točci 36.....	43
Slika 6-15. Fotografija izdanka, IMG_2012.....	45
Slika 6-16. Obradena fotografija sa sklopom diskontinuiteta, IMG_2012.....	46

Slika 6-17. Stereogram diskontinuiteta na Točci 50.....	47
Slika 6-18. Fotografija izdanka, IMG_2032.....	48
Slika 6-19. Obradena fotografija sa sklopom diskontinuiteta, IMG_2032.....	49
Slika 6-20. Stereogram diskontinuiteta na Točci 51.....	50
Slika 6-21. Fotografija Izdanka, IMG_2110.	51
Slika 6-22. Obradena fotografija sa sklopom diskontinuiteta, IMG_2110.....	52
Slika 6-23. Stereogram diskontinuiteta na Točci 55.....	52

POPIS TABLICA:

Tablica 6-1. Tablica svih točaka i setova diskontinuiteta.....	37
Tablica 6-2. Tablica setova diskontinuiteta za Točku 48.	40
Tablica 6-3. Vrijednosti fraktalnih dimenzija za Točku 48.....	40
Tablica 6-4. Setovi diskontinuiteta za Točku 36.	43
Tablica.6-5. Tablica vrijednosti fraktalnih dimenzija za Točku 36.....	43
Tablica 6-6. Tablica diskontinuiteta za Točku 50.	46
Tablica 6-7. Vrijednosti fraktalnih dimenzija za Točku 50.....	47
Tablica 6-8. Tablica diskontinuiteta za Točku 51.	49
Tablica 6-9.Vrijednosti fraktalnih dimenzija za Točku 51.....	50
Tablica 6-10. Tablica diskontinuiteta za Točku 55.	52
Tablica 6-11. Vrijednosti fraktalnih dimenzija za Točku 55.....	53
Tablica 6-12. Tablica vrijednosti svih izračunatih fraktalnih dimenzija za istraživano područje	54

POPIS JEDNADŽBI:

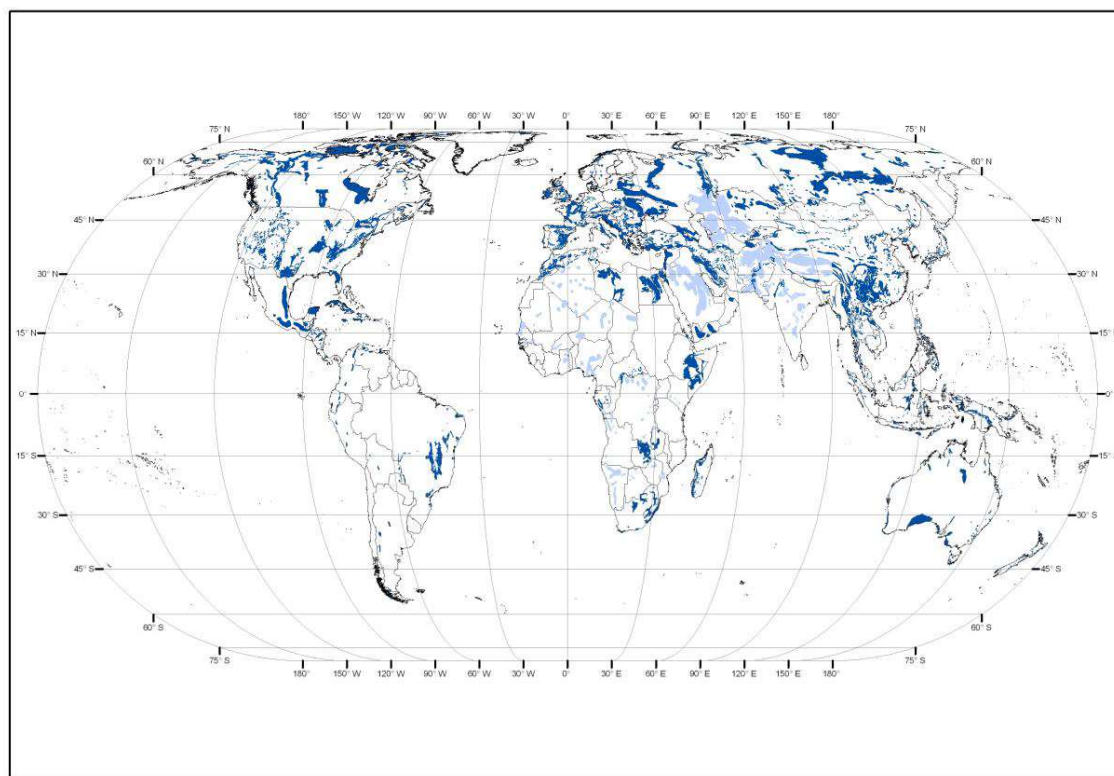
5.1. Hausdorffova mjera	21
5.2. Limes Hausdorffove mjere koji teži nuli	21
5.3. Integral volumena u slučaju da je fraktalna dimenzija manja od 3	22
5.4. Volumen elementa 0 – tog reda	23
5.5. Broj elemenata 0 – tog reda ako se ćelija fragmentira na 8 elemenata 0 – tog reda.....	23
5.6. Broj ćelija 0 – tog reda koje nisu fragmentirane.....	23
5.7. Volumen svakog elementa 1 – og reda.....	23
5.8. Broj fragmentiranih elemenata 1 – og reda	24
5.9. Broj nefragmentiranih elemenata 1 – og reda.....	24
5.10. Volumen ćelije n – tog reda.....	24
5.11. Broj ćelija n – tog reda nakon fragmentacije	24
5.12. Logaritmiranje jednadžbi 5.9. i 5.10.....	24
5.13. Fraktalna distribucija	24
6.1. Odnos za ekstrapolaciju fraktalnih dimenzija u viši red (u 2D)	27
6.2. Odnos za ekstrapolaciju fraktalnih dimenzija u viši red (u 3D)	27
6.3. Zakon fraktala, " <i>power – law</i> " funkcija	31
6.4. Standardna jednadžba za " <i>box – counting</i> " metodu	32

POPIS PRILOGA:

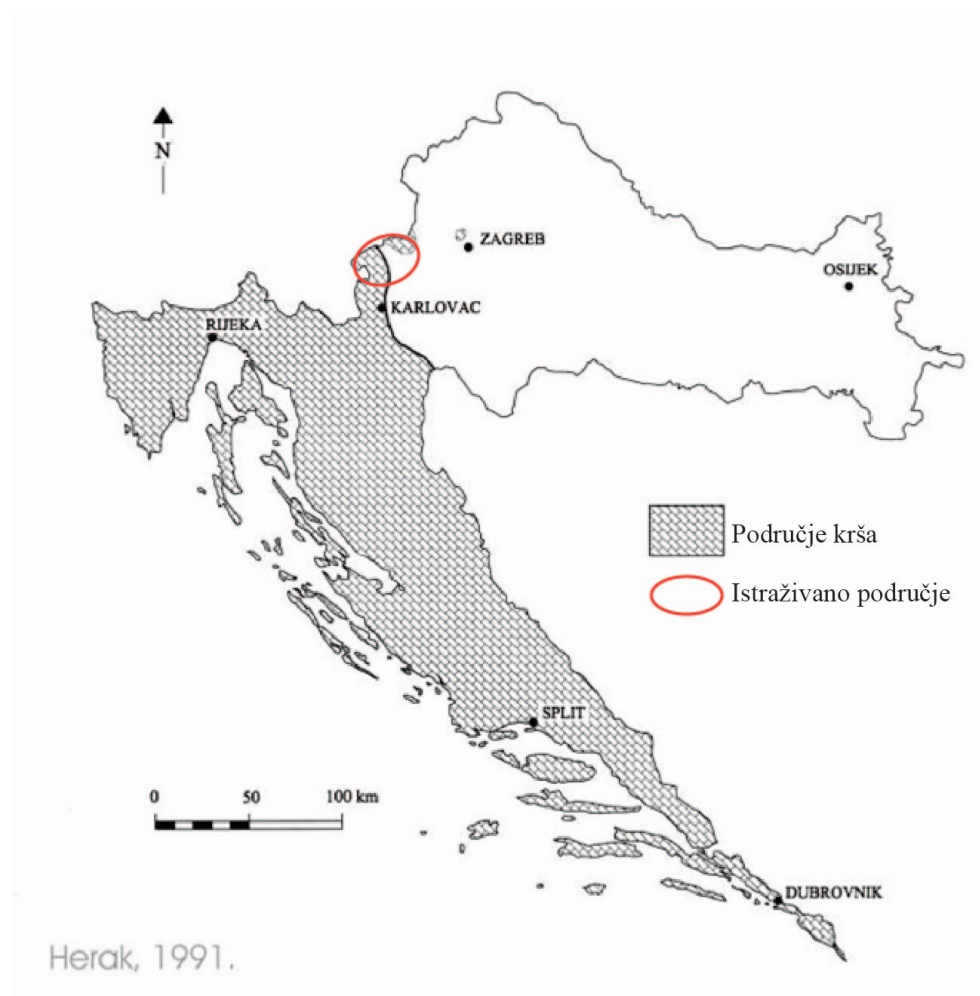
PRILOG 1 (IMG_1803)	1
PRILOG 2 (IMG_1808)	3
PRILOG 3 (IMG_1964)	4
PRILOG 4 (IMG_1967)	6
PRILOG 5 (IMG_1970)	7
PRILOG 6 (IMG_1972)	8
PRILOG 7 (IMG_2015)	10
PRILOG 8 (IMG_2016)	12
PRILOG 9 (IMG_2020)	14
PRILOG 10 (IMG_2040)	16
PRILOG 11 (IMG_2117)	18
PRILOG 12 (IMG_2119)	19
PRILOG 13 (IMG_2121)	21

1. UVOD

Stijene su karakterizirane različitim tipovima poroznosti kao što su primarna (npr. vodonosnici međuzrnske poroznosti), sekundarna (pukotinska, disolucijska itd.) te tercijarna ili kavernoza poroznost. Krški vodonosnici su karakterizirani značajnom sekundarnom i tercijarnom poroznošću, a puno manjom primarnom. Pod pojmom krš se obično podrazumijevaju područja osobitih geomorfoloških, geoloških i hidrogeoloških svojstava čiji je razvoj uglavnom vezan za karbonatne stijene, vapnence i dolomite. Stijene podložne okršavanju tvore oko 25% površine kopnenog dijela Zemlje (FORD & WILLIAMS, 2007) (Slika 1 – 1.) i gotovo 50% kopnene površine Republike Hrvatske (BAČANI, 2006) (Slika 1 – 2.). Slika 1 – 2. prikazuje krška područja južno od Karlovca, na području Žumberačke gore te ponad Zagreba na Medvednici, ali izostavlja sjevernija krška područja na gori Ivanščica te na slavonskim otočnim planinama Papuk, Krndija i Psunj.



Slika 1-1. Karta površinskog rasprostranjenja karbonatnih stijena u svijetu
(http://web.env.auckland.ac.nz/our_research/karst/#karst1).



Slika 1-2. Prikaz rasprostranjenosti krša na području Republike Hrvatske (HERAK, 1991).

Preduvjet za okršavanje stijena je tektonska oštećenost stijenске mase, stijene podložne kemijskoj razgradnji pod utjecajem vode, klimatski uvjeti s relativno velikom količinom oborina, čime stijena postaje vodopropusna, odnosno omogućen je prodor vode s površine u dublje dijelove stijena. Mehanička ili tektonska razlomljenost podrazumijeva uglavnom pukotine i druge diskontinuitete u stijenama. O značajkama pukotina kao što su povezanost, postanak, ispuna, otvorenost, položaj, pravac pružanja i dr. ovisi količina vode koja prodire u podzemlje kao i dubina, smjer i brzina gravitacijskog toka, što utječe na proces okršavanja. Sekundarna poroznost je rezultat tektonskih procesa na stijene. Kako bi razumjeli dinamiku podzemnih voda u kršu, osim hidrogeoloških istraživanja potrebno je provesti i geološka, geofizička, speleološka i geomorfološka istraživanja. Za razumijevanje krša potrebno je razumjeti litološke i stratigrafske značajke stijena, strukturne i tektonske odnose, geomorfologiju i povijesni razvoj istraživanog krškog terena.

U ovom radu napravljena je fraktalna analiza izdanaka gornjotrijaskih dolomita u dolini Slapnice u području Žumberka. Svi su izdanci karakterizirani pukotinskim sustavima koji se pojavljuju u određenom intervalu mjerila. Analizom se nastojalo pokazati kako su pukotinski sustavi odnosno sustavi diskontinuiteta (jer u njih spadaju i slojne plohe) fraktali, odnosno da su neovisni o mjerilu. Glavno svojstvo prirodnih fraktala je da su u određenom intervalu mjerila neovisni o mjerilu. Karakterizirani su fraktalnom dimenzijom koja predstavlja mjeru kojom objekt ispunjava prostor (MANDELBROT, 1982). Procjenom fraktalne dimenzije dobiva se podatak o prostornoj raspodjeli pukotinskih sustava na temelju koje se u sljedećoj fazi može izraditi DFN (engl „*discrete fracture network*“).

Pri izradi diplomskog rada obavljani su terenski radovi i obilasci reprezentativnih izdanaka gornjotrijaskih dolomita, koji su detaljno fotografirani i dokumentirani, definirani su setovi pukotina, izmjerene su vrijednosti orijentacija setova pukotina, utvrđena je ispunjenost pukotina, određena je pripadnost pojedinog izdanka određenoj geološkoj formaciji (prema GRGASOVIĆ, 1998). Na fotografijama su potom ručno izdvojene pukotine u računalnom programu *Adobe Illustrator CS6 (64bit)* čime su napravljeni preduvjeti za fraktalnu analizu fotografija. Orijentacije setova pukotina su unesene u stereograme kako bi se odredilo i definiralo polje naprezanja te smjer naprezanja.

Kao rezultat diplomskog rada dobit će se vrijednosti fraktalnih dimenzija pukotinskih sustava pojedinih izdanaka što se u daljnjoj fazi može koristiti za procjenu poroznosti, te izrade DFN-a.

2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

Geološka istraživanja na području Žumberka i Samoborskog gorja sežu još u 18. stoljeće. Najstariji geološki rad datira iz 1784. godine u kojem se HACQUET bavio pojavama željeza i bakra na području Ruda kod Samobora. Prva značajnija istraživanja na ovom području izvodio je GORIJANOVIĆ-KRAMBERGER (1894., 1894a) u kojem je izdvojio gotovo sve stijene ovog područja i načinio geološku kartu istraživanog područja. ŠUKLJE (1944) je obradio stratigrafske odnose Samoborskog gorja. HERAK (1947) se bavi zamršenom geološkom problematikom te raščlanjuje mezozojske naslage jugozapadnog dijela Žumberačkog gorja. Između 1966. i 1983. izrađene su Osnovne geološke karte mjerila 1:100 000 za područje Žumberka i Samoborskog gorja. Izrađeni su listovi Novo Mesto (PLENIČAR et al., 1975), Zagreb (ŠIKIĆ et al., 1977) i Črnomelj (BUKOVAC et al., 1984) s pripadajućim tumačima koji pokrivaju glavninu istraživanog područja. Ujedno ove karte su poslužile i kao podloga za ovo istraživanje i izradu diplomskog rada. PRELOGOVIĆ (1969) piše o neotektonskim kretanjima u području istočnog Žumberka. Novi koncept tumačenja strukturnih odnosa između Žumberka i Samoborskog gorja napisao je i dao HERAK (1986, 1990, 1991). Mobilističkim pristupom predlaže zamjenu dotadašnjih dviju glavnih geotektonskih jedinica (Vanjski i Unutrašnji Dinaridi) s četiri paleoambijenta i paleodinamska pojasa. Prema tome istraživano područje se nalazi u zoni kontakta Dinarika i na njega navučenog Superdinarika. Veću važnost daje HERAK (1991) utjecaju navlačne tektonike na Žumberačkoj gori te time dovodi pod upitnik blokovsku interpretaciju koja je predstavljena na OGK listu Novo Mesto. BUKOVAC et al. (1995) & AVDIĆ (2000) se bave rasčlambom trijaskih dolomita dok strukturne značajke Samoborskog gorja obrađuje TOMLJENOVIĆ (2000, 2002).

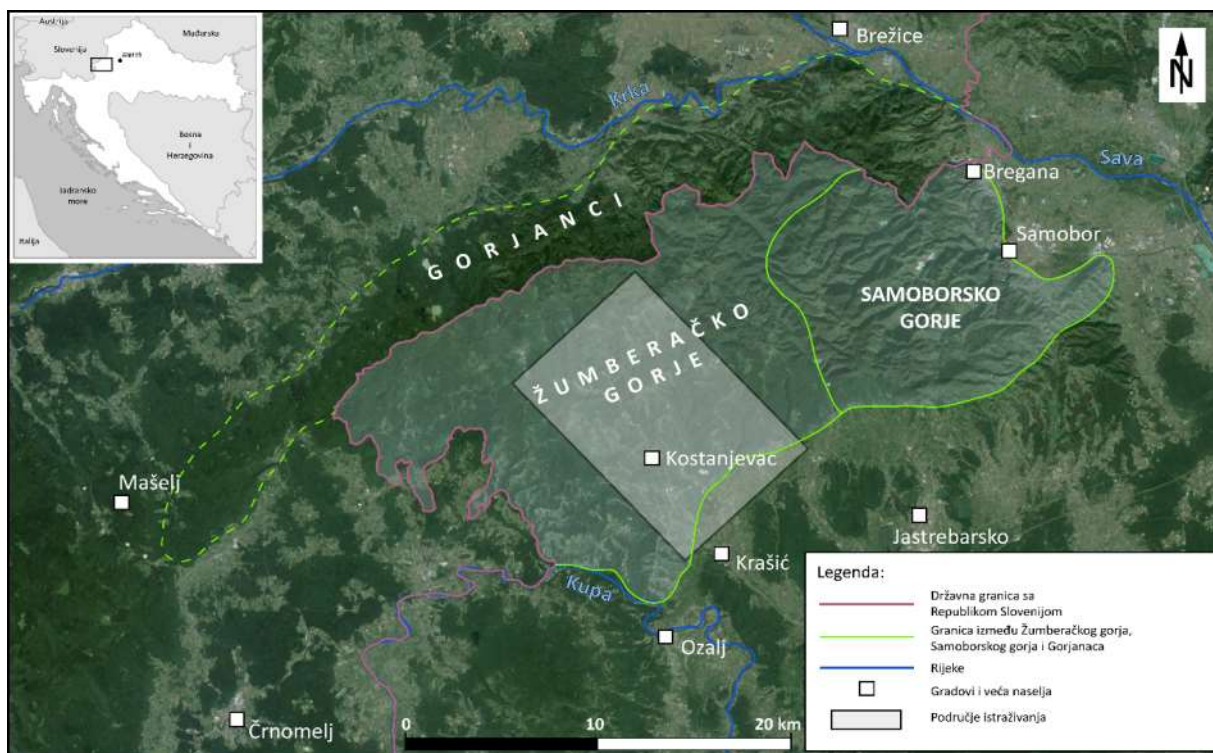
Hidrogeološka istraživanja su se provodila u puno manjem opsegu nego geološka. Značajnim se smatraju hidrogeološka karta SR Hrvatske 1:500 000 (ŠARIN et al., 1980), hidrogeološka karta SR Hrvatske 1:200 000 list Celje (HRELIĆ et al., 1994) i projekt RGN fakulteta, Gorski i prigorski vodonosnici sjeverne Hrvatske (DRAGIČEVIĆ et al., 1997a, 1997b) u kojem su regionalno interpretirani vodonosni potencijali i hidrogeološke značajke Žumberka i Samoborskog gorja. Pregled dosadašnjih hidrogeoloških radova na području Žumberka i Samoborskog gorja izradili su BRKIĆ et al., (2002), a na njihov rad, svojom disertacijom, nastavila se VUJINOVIĆ (2010). VUJINOVIĆ (2010) navodi radove koji su vezani za pojedine lokalitete gdje su provedena istraživanja kako bi se osigurala

vodoopskrba pojedinih naselja. Među radovima se ističu elaborati DELIĆA et al., (1973, 1994) i ČAKARUN & KUHTA (1987), BAHUN (1994), DRAGIČEVIĆ & MAYER (1998). FRANGEN (2013) nastavlja svoju disertaciju na VUJNOVIĆ (2010) u kojoj opisuje značajke gornjokrednog krškog vodonosnika na području jugozapadnog Žumberka pomoću kvantitativnog trasiranja izvora Jaž i Obrv.

3. GEOGRAFSKA, GEOMORFOLOŠKA I KLIMATSKA OBILJEŽJA ISTRAŽIVANOG PODRUČJA

3.1. Geografske i geomorfološke značajke

Područje istraživanja obuhvaća dolinu Slapnice u Žumberačkom gorju koja se nalazi u sjeverozapadnoj Hrvatskoj. Najviši vrh Žumberačke gore je Sv. Gera (1178m), a nalazi se na samoj granici sa Slovenijom. Veća mjesta su Krašić, Sošice i Stojdraga. Cjelinu za sebe predstavlja Samoborsko gorje koje se nalazi uz jugoistočni rub Žumberka, a granicu čini dolina rijeke Breganice i Rijeke Žumberačke. Žumberak se na slovenskoj strani nastavlja u Gorjance te zajedno s Samoborskim gorjem i Gorjancima čini jedinstvenu geomorfološku cjelinu koja se od drugih planinskih područja odvaja dolinama rijeka Save, Kupe i Krke.



Slika 3-1. Geografski položaj istraživnog područja i Žumberačke gore (Google karte).

Žumberak je zajedno sa Samoborskim gorjem svrstan u skupinu rasjedno – boranih gromadnih masiva mezozojskog nabiranja heterogenog tipa (BOGNAR, 1980). Heterogenost reljefne strukture uvjetovana je zamršenošću geološke građe i tektonske strukture šireg područja (BUZJAK, 2001). Veći dio istraživnog terena zahvaćen je

okršavanjem, neovisno o samom intezitetu okršavanja. BUZJAK (2001) govori da oko 90% teritorija Žumberka i Samoborskog gorja su zahvaćeni okršavanjem.

Smanjeni intezitet okršavanja je prisutan na strmijim predjelima gdje nagibi padina povećavaju koeficijent površinskog otjecanja. Nešto slabiji intezitet okršavanja se može primijetiti i na područjima građenim od srednjetrijaskih i gornjotrijaskih naslaga dolomita i tamo gdje se pojavljuju nepropusne naslage lapora, fliša i flišu sličnih sedimenata (BUZJAK, 2001). Geomorfološki procesi koji utječu na oblikovanje reljefa utječu na pojavu izmjenjivanja krškog i fluviokrškog reljefa. Krški reljef vezan je za dobro propusne kredne vapnence i breče varijabilne propusnosti u jugozapadnim i zapadnim dijelovima Žumberka. Time taj prostor ima svojstva tipična za Dinarski krški reljef – brojni krški oblici, bezvodna površina, razgranata podzemna cirkulacija vode i vrlo tanak sloj tla (BUZJAK, 2001). Fluviokrški reljef je vezan za slabije propusne naslage dolomita srednjeg i gornjeg trijasa gdje je uz okršavanje izrazito i egzogeno modeliranje površine (BUZJAK, 2001). Vrlo je razvijena podzemna cirkulacija, no postoji i mreža površinskih tokova s tektonski predisponiranim usječenim uskim dolinama.

Geomorfološki izuzetno je zanimljivo područje otkrivenog krša razvijenog u dobro okršenim krednim naslagama (vapnenci i breče) pokrivenih krednim i paleogenskim flišom. To se područje pruža na zapadu i jugozapadu u pojasu od linije Sv. Gera – Sošice – Krašić do rijeke Kupe na jugu te krški oblici u tom pojasu su rjeđi (BUZJAK, 2001).

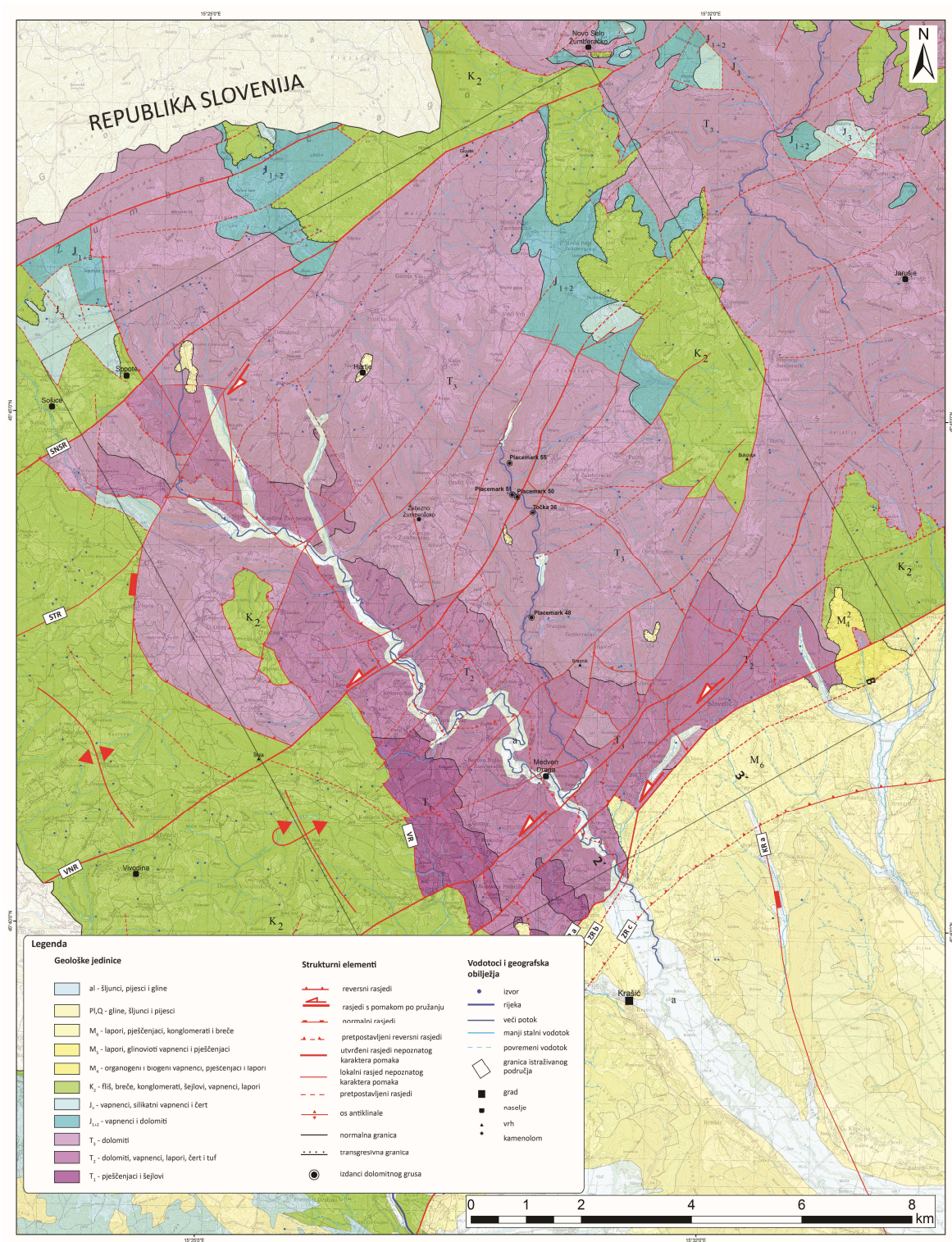
3.2.Klimatske značajke

Područje Žumberačke gore pripada umjerenom klimatskom pojasu. More ima vrlo slab utjecaj unatoč svojoj relativnoj blizini, visoka planinska pregrada Gorskog Kotara na zapadu, sprječava i umanjuje utjecaj mora. Otvorenost ovog područja prema Panonskoj ravnici uvjetuje dominantan utjecaj kontinentalne klime (FRANGEN, 2013). Prema Köpenovoj podjeli klima istraživanog područja ima klimu Cfwby tipa, što je umjereno topla kišna klima bez suhog razdoblja s toplim ljetom (KÖPPEN, 1918; VUJNOVIĆ, 2010). Taj tip klime ima dva približno jednaka kišovita razdoblja, jedno je u ranom ljetu, a drugo u jesen (VUJNOVIĆ, 2010).

Zbog izraženog reljefa prisutna je neravnomjerna raspodjela oborina i temperatura zraka, tako porastom nadmorske visine od istoka prema zapadu i od juga prema sjeveru istraživanog područja dolazi do smanjenja temperature zraka i porasta količine padalina. Srednja godišnja količina oborina za veći dio istraživanog područja je veća od 1000 mm. Istočni dio Žumberka bilježi nešto niže vrijednosti oborina od oko 900 i 1000 mm. Srednja godišnja temperatura zraka varira od 5°C u nadmorski najvišim dijelovima Žumberka do 10°C na krajnjem istoku Žumberka. Srednja siječanska temperatura iznosi -1°C u najnižim, a ispod -2°C u najvišim dijelovima Žumberka (FRANGEN, 2013). Srednja srpanjska temperatura Žumberačke gore iznosi 20°C u najnižim, a 18°C u najvišim dijelovima.

4. GEOLOŠKE ZNAČAJKE ISTRAŽIVANOG PODRUČJA

Područje istraživanja karakterizirano je vrlo kompleksnom geološkom građom (Slika 4 – 1.) koja je rezultat različitih uvjeta sedimentacije kroz geološku prošlost, promjenjivih i kompleksnih tektonskih pokreta. Kompleksna geološka građa uočljiva je u čestim lateralnim i vertikalnim izmjenama različitih litotipova (Slika 4 – 1.). Prikaz površinske geološke građe je načinjen na temelju listova OGK Zagreb (ŠIKIĆ et al. 1977) i Novo Mesto (PLENIČAR et al. 1977), mjerila 1:100 000 te njima pripadajućih tumača: Zagreb (ŠIKIĆ et al. 1977) i Novo Mesto (PLENIČAR et al. 1977).



Slika 4-1. Geološka građa istraživanog i šireg područja (PAVIČIĆ in prep.)

4.1. Geološke značajke

4.1.1. Mezozoik

Stijene Mezozoika prekrivaju najveći dio Žumberačke gore. Većina sedimentata Žumberačke gore i šireg područja pripadaju trijaskim sedimentima. Najveće površinsko rasprostiranje imaju gornjotrijaske naslage (T_3), koje ujedno i prekrivaju cijelo područje istraživanja.

4.1.1.1. Donjotrijaski sedimenti (T_1)

Sedimenti donjeg trijasa na Žumberku se nalaze južno i jugozapadno od Medven drage te sjeverozapadno od Krašića. Naslage koje čine donji trijas su pješčenjaci, siliti, dolomitizirani vapnenci, dolomiti i kalcitični lapori. Klastiti terigenog podrijetla prevladavaju u starijem dijelu naslaga, dok u mlađem dijelu su češći karbonatni sedimenti. Unutar donjotrijaskih naslaga su izdvojene litostratigrafske jedinice *Konjarić Vrh* i *Ludvić* (AVANIĆ et al., 2000).

Konjarić Vrh je litostratigrafska jedinica koja se sastoji od facijesa tinjčastih pješčenjaka s ooidnim vapnencima, silita s proslojcima pješčenjaka i pješčenjaka s proslojcima vapnenaca (AVANIĆ et al., 2000). Debljina jedinice je 175 m te karakteristična je po crvenkastosmeđoj boji, horizontalnoj, kosoj i valovitoj laminaciji te pojavi valnih riplova i bioturbacija (AVANIĆ et al., 2000). Naslage su donjoskitske starosti te je na temelju fosila koji gotovo da nema, nemoguće odrediti točniju starost. Smatra se da su klastiti i karbonati ove jedinice taloženi vjerojatno u priobalnom marinskom okolišu, točnije u plitkom i uzburkanom moru (AVANIĆ et al., 2000).

Ludvić jedinica je gornjoskitske starosti, a debljina jedinice ne prelazi 175 m. Izgrađena je od facijesa ooidnih kalkarenita s laminama pješčenjaka, vapnenaca s proslojcima lapora, laminiranih kalkarenita s proslojcima vapnenaca i kalsilita s ooidnim kalkarenitima (AVANIĆ et al., 2000). Naslage su taložene u prijelaznoj zoni između obalnog lica i šelfa. Facijes ukazuje na marinsku transgresiju na prijelazu iz perma u donji trijas te zbog velike količine kopnenog materijala prevladava deltni okoliš (AVANIĆ et al., 2000). U razdoblju olenekija okoliš se produbljava i talože se naslage prijelazne zone, time se kontinuitet sedimentacije nastavlja u aniziku taloženjem karbonata u morskom plićaku (AVANIĆ et al., 2000).

4.1.1.2. Srednjetrijaski sedimenti (T_2)

Predstavljene su formacijom *Ruškovlje* u kojoj su izdvojena dva člana *Berdiki* i *Kolići* (BUKOVAC et al., 1995). Ove naslage su predstavljene uglavnom ranodijagenetskim dolomitima te su ti dolomiti često rekristalizirani, zbog čega ih se naziva šećerasti dolomiti, prividno u potpunosti neuslojeni. Rekristalizacija je vezana uz tektonske zone, no često je prisutan i proces dedolomitizacije (BUKOVAC et al., 1995).

Formacija *Ruškovlje* je predstavljena ranodijagenetskim dolomitom koji je taložen u peritajdalnom okolišu uz povremene oscilacije morske razine te se u izmjeni nalaze laminirani (Slika 4 – 2.) dolomitizirani stromatoliti (Slika4 -1.), dolopelmikriti i fenestralni dolopelmikriti (BUKOVAC et al., 1995).



Slika 4-2. Debelouslojeni srednjetrijaski stromatolitni dolomiti (lokalitet: Puškarov jarak).

Član Berdiki se nalazi u donjem dijelu te zajedno s *Članom Kolići* predstavlja privremene prekide karbonatno – platformskog taložnog sustava uz formiranje riftnih struktura, diferencirano gibanje blokova u vulkansku aktivnost te je time uzrokovano taloženje klastita i piroklastita i konačno pločastih vapnenaca s rožnjacima koji se nalaze u gornjem dijelu člana *Kolići* (BUKOVAC et al., 1995). *Član Berdiki* se javlja u vrijeme anizika te ga uglavnom čine crveni pjeskoviti lapori, a *Član Kolići* početkom ladinika, čine

ga slititi, lapori, piroklastiti, rožnjaci te u vršnom dijelu naslaga slijede silificirani vapnenci i pločasti sivi vapnenci s pojavama rožnjaka (BUKOVAC et al., 1995). Debljina srednjotrijaskih naslaga je procijenjena na 590 m (BUKOVAC et al., 1995).



Slika 4-3. Stromatolitne lamine u srednjotrijaskim dolomitima (lokalitet Puškarov jarak).

4.1.1.3. Gornjotrijaski sedimenti (T_3)

Dolomiti gornjeg trijasa su najznačajnije litološke naslage u strukturnoj građi istočnog Žumberka. Zauzimaju područje od rijeke Save i Krke na sjeveru do linije Plešivica – Slavetić – Rude. Debljina naslaga se procjenjuje na oko 800 m. Udio CaCO_3 rijetko prelazi 10%. Boja sedimenata je svjetlosiva do tamnosiva što ponajviše ovisi o udjelu glinovite komponente. Dio dolomita se odlikuje ravnom algalnom laminacijom (stromatoliti) što ukazuje da je do dolomitizacije došlo vjerojatno u ranoj fazi diageneze.

Formacija Slapnica debljina naslaga formacije Slapnica je oko 340 m (GRGASOVIĆ, 1998). Naslage formacije su *dolomitne*, a javljaju se proslojci slabo litificiranih šejlova i karbonatnih laminata. Uočljive su pojave visokog udjela organske tvari (kerogena). Dolomiti su ranodijagenetski, često rekristalizirani u kristalasti dolomit.

Dolomiti su dobro uslojeni te jasno izraženih slojnih ploha koje su pretežno ravne ili blago neravne. Iznimno imaju oblike erozijskih kanala ili su tektonski poremećeni i izlomljeni. Debljina slojeva se kreće u rasponu od 20 do 50 cm (GRGASOVIĆ, 1998).

Na slojevima je jasno uočljiva cikličnost, što je ujedno i osnovna karakteristika ovih naslaga. Ciklički se izmjenjuju dolomikriti, fenestralni dolomikrit i dolostromatolit (GRGASOVIĆ, 1998). Ciklička izmjena je uobičajeno pravilna te je postepena, dok na nekim mjestima može i izostati.

Dolomikriti zauzimaju oko 76% ukupne debljine naslaga, fenestralni dolomikriti oko 16%, dolostromatoliti oko 7%, a šejlovi i laminiti oko 1% ukupne debljine (GRGASOVIĆ, 1998).

Naslage su slabo fosilizirane te su rijetki fosiliferni slojevi i proslojci u kojima najčešće nalazimo ostatke foraminifera.

Član Vranjak je po raspodjelenju i karakteristikama slojevitosti identičan formaciji Slapnica. Debljina naslaga iznosi oko 80 m. Sedimentološke karakteristike su iste kao i kod čitave formacije, što je ciklična izmjena dolomikrita, fenestralnih dolomikrita i dolostromatolita (GRGASOVIĆ, 1998).

Član Drenovac u debljini, sedimentološkim karakteristikama i udjelu organske tvari dosta varira. Praćenje i prisutnost ovog člana je otežano prekrivenošću terena i tektoniziranosti, no prosječno izmjerena debljina je oko 80 m (GRGASOVIĆ, 1998). Izgrađen je od ranodijagenetskog dolomita, izražene slojevitosti koja je često valovita. Ove stijene su bogate kerogenkim tvarima te su česti proslojci kerogenkih šejlova i laminita, vrlo rijetko ugljena (GRGASOVIĆ, 1998). Početak člana se može prepoznati dobro uslojenim crnim dolomikritima. Cikličnost se mjestimično dobro uočava, ali članovi ciklusa su dolomikriti i kerogenki šejlovi (GRGASOVIĆ, 1998).

Formacija Glavni dolomit koja se prepoznatljivo naziva "hauptdolomit" te je po tom nazivu i svjetski poznata. Isti naziv se koristi u različitim zemljama svijeta zbog ujednačenih karakteristika i velikog rasprostranjenja ove formacije.

Široko su rasprostranjenje cijelim područjem istraživanja te izgrađuju središnji dio Žumberka. Debljina naslaga formacije Glavnog dolomita je procijenjena na oko 960 m (GRGASOVIĆ, 1998).

Formacija je prepoznatljiva po pojavi dolomita s finovalovitim stromatolitima ili horizontalnom laminacijom. Donji dio formacije Glavni dolomit zauzima veći dio i tipičan je za ove naslage te se ne izdvaja kao poseban član, što je dopušteno Međunarodnim stratigrafskim vodičem (GRGASOVIĆ, 1998; SALVADOR, 1994). Karakteristično za Glavni dolomit Donji dio formacije se javlja u bočnoj i vertikalnoj izmjeni tri tipa ranodijagenetskih dolomita: dolomikrita, dolomitnih stromatolita i fenestralnih dolomikrita (GRGASOVIĆ, 1998)

Naslage su rijetko fosilisferne, no u proslojcima koji sadrže fosile se mogu naći foraminifere. Pravilna cikličnost u ovim naslagama nije uočljiva.

Član Kalje čine intraformacijske dolomitne breče. Naslage nisu kontinuirane te se između breča javljaju slojevi ranije opisanih dolomita (GRGASOVIĆ, 1998). Starost ovih breča je određena na temelju foraminifera unutar klasta, koje se isto tako nalaze i u podini ovih breča (GRGASOVIĆ, 1998). Klasti su izgrađeni od ranije opisanih tipova ranodijagenetskog dolomita: dolomikrita, dolomitnih stromatolita i fenestralnih dolomikrita. Dimenzije su submilimetarske do 30 cm, te su izrazito nesortirani.

Postanak ovih breča se može objasniti pomoću dva moguća objašnjenja: djelovanjem olujnih struja koje su pokidale djelomično litificirane slojeve te seizmičkom aktivnošću koja je lomila djelomično litificirani sediment.

Formacija Posinak je debljine od oko 270 m. Donja granica je karakterizirana pojavom uslojenih dolomita s horizontalnom laminacijom, a gornja granica je karakterizirana pojavom valovito uslojenih vapnenaca s ooidima (GRGASOVIĆ, 1998). Starost je određena kao ret na temelju superpozicije jer se nalazi iznad formacije *Glavni dolomit* te ispod formacije *Rajići* koja je lijaske starosti (GRGASOVIĆ, 1998). Sive su boje te su često rekristalizirani tj. dolomitizirani. Bitno se razlikuju od formacije *Glavnog dolomita* po promjeni tipa stromatolita, povećanju udjela dolomikrita u odnosu na ostale strukturne tipove te javljanje jasnih slojnih ploha koje su uglavnom ravne, osim u vršnom dijelu gdje su blago valovite (GRGASOVIĆ, 1998). Na izdancima naslaga ne uočava se cikličnost.

Taložni okoliš u kojem je jedinica taložena je subtajdalni koji dominira nad intertajdalnim, to ukazuje na izvjesno produbljivanje sedimentacijskog prostora, time

možemo zaključiti da je taložni okoliš peritajdal – subtajdal do intertajdal (GRGASOVIĆ, 1998).

4.2.Strukturno – tektonske značajke

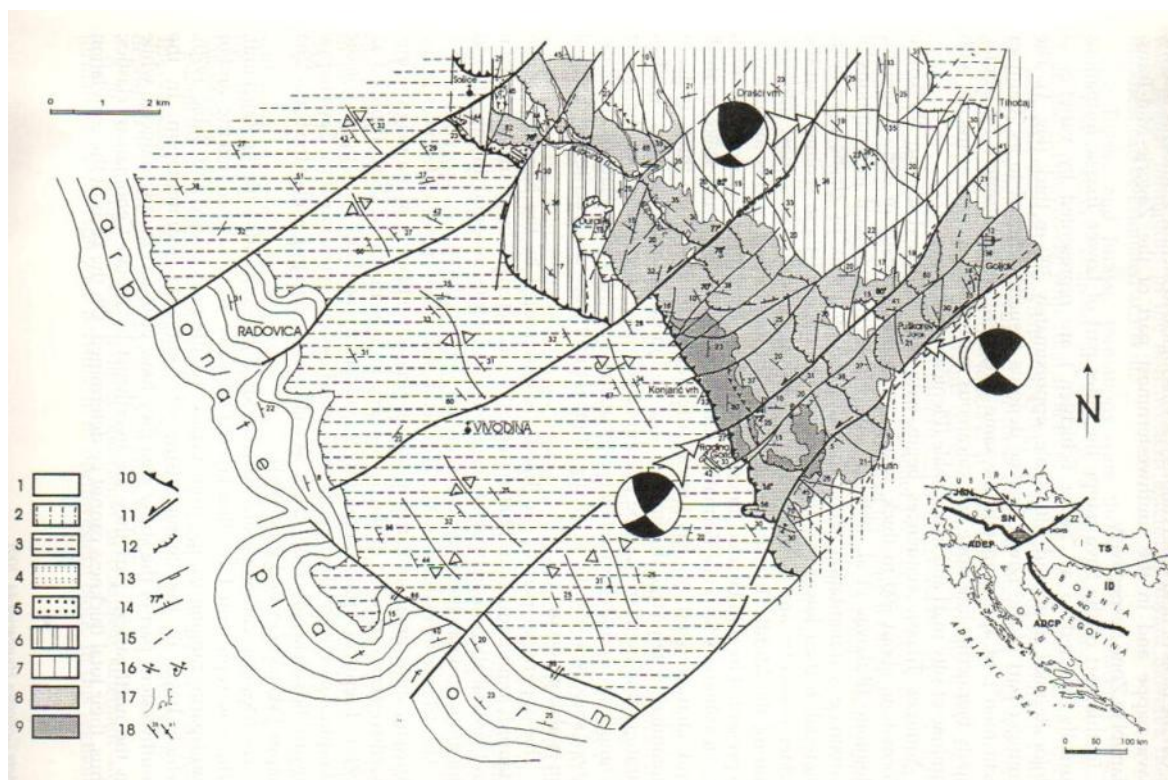
Žumberačka gora zajedno sa Samoborskom gorom tvori jedinstvenu orografsku geološku jedinicu na rubnim dijelovima sjeverozapadnih Dinarida i južnih Alpi (PRTOLJAN, 2001). Na tom području se susreću tekto – stratigrafske jedinice unutarnjih i vanjskih Dinarida te južnih Alpi. Glavni strukturne i tektonske značajke predstavljene su borano-navlačnim odnosima (PRTOLJAN, 2001). Također duž jugoistočnog ruba uočljive su morfološke i strukturne karakteristike koje su obilježene lijevim rasjedima s pomakom po pružanju (PRTOLJAN, 2001).

Područje istraživanja se razmatra kao dio više različitih tektonskih jedinica (PRTOLJAN, 2001)

1. Zona unutarnjih Dinarida (PETKOVIĆ, 1958)
2. Zona visokogkrša (GRUBIĆ, 1980)
3. Julijsko – Alpske i Savske bore - Zona Zagreb (DIMITRIJEVIĆ, 1982)
4. Savska navlaka (MIOČ, 1982; PAMIĆ, 1993)
5. Supradinarik (HERAK, 1986, 1991)
6. Srednje transnubijska zona (HAAS et al. 1995)
7. Zagorje – srednje mid – transnubijska zona (PAMIĆ & TOMLJENOVIĆ, 1998)

Istraživano područje je svoja glavna strukturna obilježja poprimilo tijekom srednje i gornjo-eocenske kompresije koja uključuje i cijelo područje Dinarida, to vrijeme je karakterizirano s borama nastalim reversnim imbriciranim rasjedima (PRTOLJAN, 2001). Mezozojska karbonatna platforma duž svoje jugozapadne granice je u borano-navlačnom odnosu s gornjokrednim klastitima duž starije rasjedne zone koja je paralelna rubu savske navlake (PRTOLJAN, 2001). Današnja geomorfološka i orografska obilježja su nastala nakon gornjeg miocena kada su stare bore i reversni rasjedi došli pod utjecaj glavnih smičnih rasjeda, smjera pružanja sjeveroistok – jugozapad te je Žumberačka gora odvojena od neogenskih karbonatno klastičnih sedimenata, regionalno značajnim rasjedom koji se nalazi na južnom rubu Žumberka (PRTOLJAN, 2001).

Rasjedni sustav sjeveroistok – jugozapad je karakteriziran blago zakrivljenim rasjednim plohama i s anastomoznim strukturama te rasjedi su s pomakom lijevog karaktera koji su definirani pomoću uočljivih strija, dok zapadno od rasjedne zone se nalaze kataklazirani dolomiti (PRTOLJAN, 2001).



Slika 4-4. Odnosi između rasjedno - boranih i horizontalnih mehanizama Žumberačke gore i dijela Savske doline (Prtoljan, 2001).

1. Kvarter; 2. Neogen; 3. Gornja kreda – Mاستriht; 4. Donja rana kreda (hautervij – cenoman); 5. Jura; 6. Prebačeni gornji trijas blizu Duralija; 7. Gornji trijas; 8. Srednji trijas; 9. Donji trijas; 10. Rub doline; 11. Lijevi smični rasjed; 12. Reversni rasjed; 13. Normalni rasjed; 14. Rasjed s nagibom rasjedne plohe; 15. Predpostavljani rasjed; 16. Normalna ili prebačena bora; 17. Normalna ili transgresivna granica; 18. Normalni ili prevrnuti sloj.

Legenda za malu kartu: Ž – Žumberak; ID – Unutrašnji Dinaridi; JSN – Julijsko – Savinjska navlaka; SN – Savska navlaka; ADCP – Jadransko – Dinaridska karbonatna platforma; ZZ – Zagreb – Zemplen rasjed; Periadrijatski rasjedni sustav; TS – Tisia.

Orijentacija kompresijskog režima naprezanja je na temelju mjerenih rasjeda definiran kao sjever – jug do sjeveroistok – jugozapad (Slika 4 – 3.) (PRTOLJAN, 2001).

Najmlađi rasjedi su rasjedi pružanja S – J te time pridonose složenosti istraživanog područja. Rasjedi su vertikalni do subvertikalni, normalnog karaktera i relativno malih pomaka (PRTOLJAN, 2001).

Prema PRTOLJAN (2001) može se zaključiti da je glavnu ulogu u formiranju recentnog strukturnog sklopa imao kompresijski režim naprezanja smjera sjever – jug. Isto tako sustavi lijevih smičnih rasjeda SI – JZ su imali veliku ulogu u regionalnom mjerilu predstavljajući najvažniji zapadni dio rasjednog sustava Zagreb – Zemplen, pružanja SZ –

II. Navedeni rasjedni sustavi omeđuju Žumberak i Samoborsko gorje na jugoistoku i zaključuju jugozapadni dio Srednjezagorsku mid-transdanubijsku zonu između Dinarida i Alpi.

5. FRAKTALNA GEOMETRIJA I POVEZANOST FRAKTALA S GEOLOGIJOM

Geološke pojave se pojavljuju u velikom rasponu mjerila, od mjerila kristalne rešetke do regionalnog mjerila. Te za neke pojave se može reći kako su neovisne o mjerilu, što dokazuje činjenica da ukoliko ne postoji objekt s kojim se neka pojava na fotografiji može usporediti, gotovo je nemoguće zaključiti radi li se o milimetarskom, metarskom ili kilometarskom mjerilu. To svojstvo se naziva sebisličnost (eng. *"self-similarity"*), a objekti ili pojave koje su karakterizirane tim svojstvom se nazivaju fraktali (MANDELBROT, 1983).

Jedan od najpoznatijih primjera fraktala u prirodi je obala Velike Britanije snimljena iz zraka. Ukoliko slika nema izraženo mjerilo, nemoguće je odrediti s koje visine je snimka napravljena te time je Beniot MANDELBROT (1967) prvi puta predstavio pojam fraktala. Fraktalna dimenzija (Husdorffova ili Hausdorff – Besicovitch – ova) je najvažnije svojstvo fraktala.

Primjena fraktala i fraktalne geometrije je primjenjiva u različitim područjima geologije: (MACE et al, 2005)

- Strukturna geologija, seizmologija i seizmotektonika – prostorna raspodjela rasjeda, pukotina i njihovih zona. Prostorna i vremenska pojava potresa
- Sedimentologija – cikličnost u sedimentaciji, raspodjela veličine zrna/klasta u sedimentima
- Geomorfologija – geometrija reljefa, geometrija drenažne mreže i dr.
- Istraživanje krša – geometrija speleoloških objekata, hrapavost zidova i špilja, jama i pukotina
- Hidrogeologija – tok podzemne vode u vodonosnicima s međuzrnskom i pukotinskom poroznošću

5.1. Definicija fraktala i koncept Hausdorffove fraktalne dimenzije

MANDELBROT (1983) zaključuje kako se u prirodi pojavljuje puno naizgled nepravilnih objekata i pojava koje se ne mogu definirati topološkim dimenzijama (oblaci, munje, planine i dr.). Dimenzija tih pojava se često opisuje Hausdorff-ovom dimenzijom koja predstavlja mjeru koliko neki objekt ispunjava metrički prostor koji se može mjeriti preko nekog parametra. Kako bi razumjeli fraktale i fraktalnu dimenziju potrebno je definirati pojmove Hausdorffova mjera, prostor i dimenzija:

δ -prekrivanje nekog skupa F je prebrojiv (konačni) zbroj skupova $\{U_i\}$, s polumjerima, $0 < |U_i| \leq \delta$ koji prekrivaju skup F . Neka je $F \subset R^n$ i neka je $s \in [0, \infty)$, za svaki $\delta > 0$, Hausdorffova mjera bit će definirana kao:

$$H_\delta^s(F) = \inf \left\{ \sum_i |U_i|^s : \text{je } \delta\text{-prekrivanje skupa } F \text{ s "kuglama" radijusa } |U_i| > 0 \right\} \quad 5.1.$$

Tražimo sva moguća prekrivanja skupa F s najvećim promjerom δ i nastojimo minimizirati sumu s potencija polumjera (FALCONER, 2014). Smanjivanjem δ , smanjuje se i broj mogućih prekrivanja, a vrijednost infimuma $H_\delta^s(F)$ raste ili se ne mjenja kako se δ smanjuje i približava limesu koji teži nuli (5.2.) (FALCONER, 2014)

$$H^s(F) = \lim_{\delta \rightarrow 0} H_\delta^s(F) \quad 5.2.$$

Ovaj limes je za svaki podskup F skupa R^n , iako je često granična vrijednost 0 ili ∞ . $H_\delta^s(F)$ naziva se s – dimenzionalna Hausdorffova mjera nekog skupa F . Hausdorffova mjera predstavlja mjeru metričkog prostora koja svakom skupu iz R^n dodjeljuje neku vrijednost iz intervala $[0, \infty]$ (FALCONER, 2014).

Hausdorffova dimenzija definira mjeru kojom zadani skup metrički ispunjava (mjerljivim parametrom) prostor. Hausdorffove dimenzije za: točku $D = 0$, pravac $D = 1$, kocka $D = 3$. Hausdorffova dimenzija se često rabi za opis fraktalne dimenzije. MANDELBROT (1983) definira fraktal kao skup, objekt ili pojavu čija je Hausdorffova dimenzija (D) veća od topološke (D_T).

Za primjer i objašnjenje možemo koristiti primjer duljine obale Velike Britanije (MANDELBROT, 1967). Linija obale koja je neravna se javlja u kilometarskom, metarskom, centimetarskom, milimetarskom mjerilu te sve do beskonačno malog mjerila. Smanjivanjem mjerila opažanja, obalna linija je dulja te u slučaju beskonačno malog mjerila postaje beskonačno dugačka. Time zaključujemo kako za opis takve krivulje nije dovoljna jedna dimenzija. Promatramo li obalnu liniju u dvodimenzionalnom prostoru, površina joj je 0, što znači da obala nije niti dvodimenzionalna, nego se dimenzija obale nalazi u intervalu $[1, 2]$.

5.1.1. Fragmentacija i fragmentacijski modeli

Fragmentacija je važan dio mnogih geoloških procesa i pojava (TURCOTTE, 1997). Stijene se mogu fragmentirati na razne načine, tektonskim procesima koji uzrokuju rasjedanje, stvaranje pukotina i pukotinskih sustava po kojima se stijena može dalje fragmentirati trošenjem ili tektonskim procesima (TURCOTTE & HUANG, 1995; TURCOTTE, 1997).

Raspodjela pukotina, pukotinskih sustava i rasjeda se rješava statistički tako da se koriste razni odnosi za prikazivanje distribucije fragmenata, a dvije najprimjenjivije metode su *log* – normalna i potencijska distribucija (TURCOTTE & HUANG, 1995). Fraktalna dimenzija u fragmentacijskim procesima varira u intervalu od $2 < D < 3$ (TURCOTTE & HUANG, 1995; TURCOTTE, 1997). U slučaju da je fraktalna dimenzija manja od 3, tada je integral volumena:

$$V = \int_{r_{min}}^{r_{max}} r^3 dN \quad 5.3.$$

da bi se volumen izračunao potrebno je odrediti r_{max} , ali ne nužno i r_{min} . r označava linearnu dimenziju fragmenata, a r_{max} i r_{min} ovise o intervalu mjerila u kojem se fragmenti pojavljuju.

Model prikazan slikom 5 – 1. je temeljen na iterativnom postupku fragmentacije i renormalizaciji. Kocka s linearnom dimenzijom h naziva se ćelija $0 - tog$ reda, a broj ćelija $0 - tog$ reda je N_0 . Svaka ćelija $0 - tog$ reda se može fragmentirati na 8 kocki jednakih dimenzija $\frac{h}{2}$, elemente $0 - tog$ reda. Volumen elementa $0 - tog$ reda je definiran izrazom:

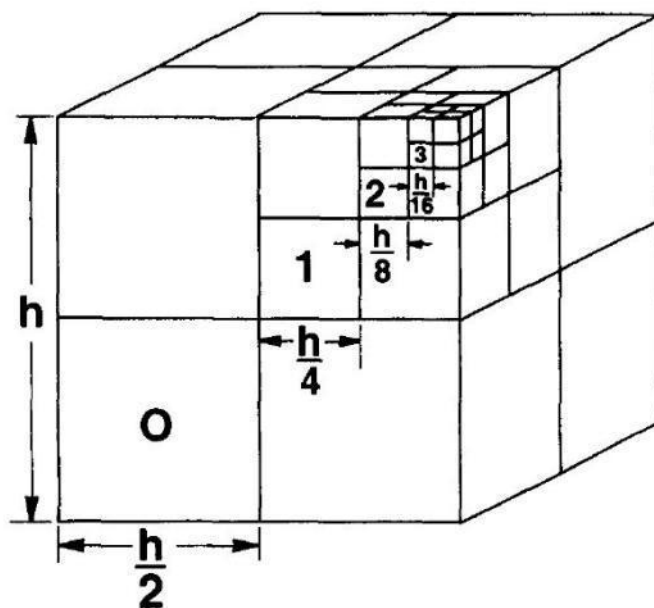
$$V_1 = \frac{1}{8} \times V_0 \quad 5.4.$$

gdje je V_0 , volumen ćelije 0 -tog reda. Ako je vjerojatnost da će se ćelija 0 -reda fragmentirati na osam elemenata 0 -tog reda f , tada će broj elemenata 0 -tog reda biti:

$$N_1 = 8 \times f \times N_0 \quad 5.5.$$

Broj ćelija 0 – tog reda koje nisu fragmentirane, definiran je:

$$N_{0a} = (1 - f) \times N_0 \quad 5.6.$$



Slika 5-1. Idealizirani model fraktalne fragmentacije (TURCOTTE, 1997).

Elementi 0 – tog reda postaju ćelija 1 – og reda, procesom renormalizacije te se smatraju ćelijom n – tog reda i mogu se dalje fragmentirati. Svaka ćelija prvog reda može se fragmentirati na 8 kockica elemenata prvog reda dimenzije $\frac{h}{4}$. Volumen svakog elementa 1 – og reda je:

$$V_2 = \frac{1}{8} \times V_1 = \frac{1}{8^2} \times V_0 \quad 5.7.$$

Vjerojatnost daljnje fragmentacije ćelija prvog reda je f kako bi ostala neovisnost o mjerilu. Broj fragmentiranih elemenata l – og reda je:

$$N_2 = 8fN_1 = (8f)^2N_0 \quad 5.8.$$

Broj nefragmentiranih elemenata nakon što je provedena fragmentacija elemenata l – og reda:

$$N_{1a} = 8f(1 - f)N_0 \quad 5.9.$$

Proces fragmentacije sukcesivno se može primjenjivati do n – tog reda. Tada volumen ćelije n – tog reda je:

$$V_n = \frac{1}{8^n} V_0 \quad 5.10.$$

Nakon fragmentacije, broj ćelija n – tog reda je:

$$N_{na} = (8f)^n \times (1 - f)N_0 = (8f)^n N_{0a} \quad 5.11.$$

Prirodnim logaritmiranjem prethodnih jednadžbi 5.9. i 5.10. i eliminacijom n – a iz novonastalih jednadžbi, dobivamo:

$$\frac{N_{na}}{N_{0a}} = \left(\frac{V_n}{V_0} \right)^{\frac{-\ln 8f}{\ln 8}} \quad 5.12.$$

Stavimo li tu jednadžbu u odnos s jednadžbom 5.9., dobivamo fraktalnu distribuciju:

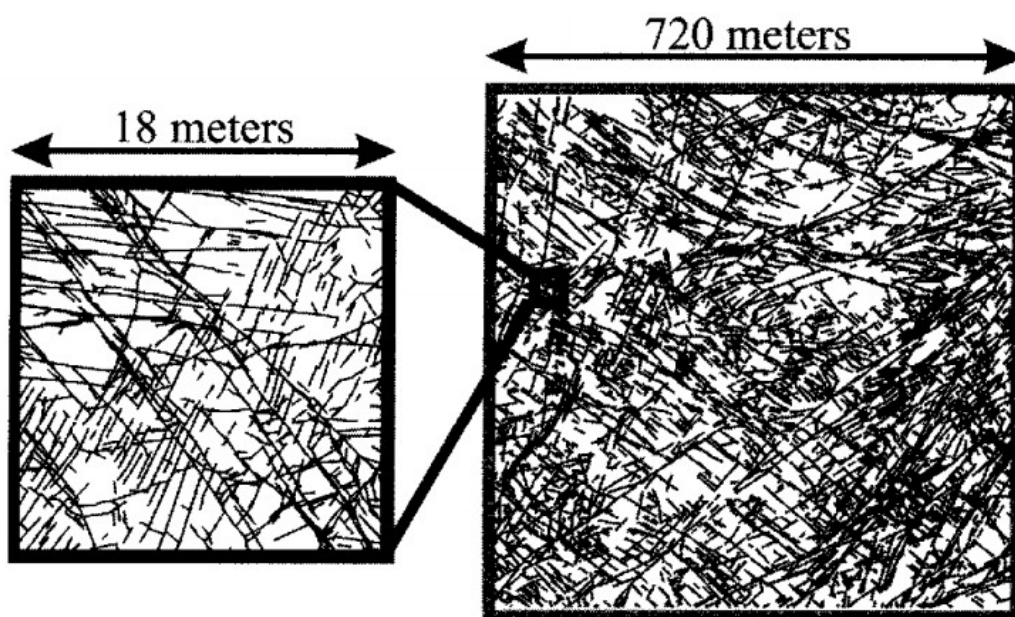
$$D = 3 \times \frac{\ln 8f}{\ln 8} \quad 5.13.$$

Ovaj idealiziran model prikazuje na koji način fragmentacija neovisna o mjerilu rezultira fraktalnom distribucijom. Model povezuje vjerojatnost fragmentacije f s fraktalnom dimenzijom, no ne daje granice kretanja D .

Fraktalna geometrija daje mogućnost kvantifikacije geometrijskih oblika koji se ponavljaju u nekom intervalu mjerila (BARTON, u TURCOTTE & HUANG, 1995). Može se koristiti za kvantifikaciju raspona mjerila prostorne raspodjele pukotinskih sustava u istraživanim vodonosnicima. Isto tako fraktalni opis pukotinskih sustava daje podlogu i za hidrogeološke interpretacije jer tok koji se ostvaruje kroz fraktalni medij također ima fraktalna svojstva (BARKER, 1988; BARTON u TURCOTTE & HUANG, 1995; VERBOVŠEK, 2009).

5.1.2. Fraktalna raspodjela i dimenzija rasjednih pukotina i pukotinskih sustava

U stijenama možemo promatrati diskontinuitete u svim mjerilima u kojima se stijene pojavljuju, od dimenzijama mikrona do preko stotine kilometara (BONNET et al., 2001; DAVY et al., 2006). Svojstva diskontinuiteta, rasjeda i pukotina u raznim mjerilima je vrlo važno kvantificirati jer na taj način se određuju njihove uloge u toku fluida. Pukotinski sklop često ima slične značajke u cijelom rasponu mjerila (TCHALENKO, 1970), karakteriziran je temeljnim svojstvom fraktala, a to je samosličnost (Slika 5 – 2.) (DAVY et al., 2006).



Slika 5-2. Karte pukotinskog sklopa u Hornelen bazenu (Norveška) (DAVY et al., 2006). Iz slika je vidljivo da je bez oznake mjerila nemoguće odrediti koju površinu karta prikazuje tj pukotinski sklop ima svojstvo neovisnosti o mjerilu i samosličnosti (DAVY et al., 2006).

Važna primjena fraktalne geometrije u geologiji i hidrogeologiji je da nema mjerila homogenizacije sustava ili reprezentativnog elementarnog volumena (REV) u određenom intervalu mjerila. Unatoč činjenici da postoji povećanje broja pukotina prema potencijalnom zakonu u krupnijim mjerilima, udio manjih pukotina u toku fluida se smanjuje (BARTON u TURCOTTE & HUANG, 1995). Gledajući generalno na rasjedni i pukotinski sustav, u toku fluida najviše doprinose najveće pukotine ili rasjedi te idući prema krupnijim mjerilima i manjim pukotinama doprinos u toku fluida se smanjuje (BARTON, u TURCOTTE & HUANG, 1995). Bez obzira na veličinu pukotina, utjecaj malih pukotina ne treba zanemariti jer njihova brojnost je puno veća (DAVY et al., 2006). Fraktalna dimenzija se može procjenjivati iz (BARTON, u TURCOTTE & HUANG, 1995):

- 1D podataka – mjerenje udaljenosti pukotina na jezgrama bušotina
- 2D podataka – detaljno snimanje izdanaka, zasjeka, usjeka i kamenoloma
- 3D podataka – detaljna geofizička snimanja i detaljno kartiranje izdanaka te njihova kombinacija

Fraktalne dimenzije pukotinskih sustava mogu se procjenjivati iz fotografija izdanaka (BARTON, u TURCOTTE & HUANG, 1995; VERBOVŠEK, 2009). Za analizu i pridobivanje podataka o pukotinskim sustavima u stijenama, obrada fotografija može poslužiti kao koristan i dobar alat (WANG, 2016).

6. PROCJENA FRAKTALNE DIMENZIJE GORNJOTRIJASKIH DOLOMITA ŽUMBERAČKOG GORJA

Razlomljeni gornjotrijaski dolomiti zbog značajne sekundarne poroznosti mogu biti vrlo značajni vodonosnici. U plićim strukturama mogu sadržavati kvalitetnu pitku podzemnu vodu, u dubljim, geotermalnu vodu i ugljikovodike. Kroz rasjedne zone, rasjede i pukotinske sustave dolazi do infiltracije oborina u podzemlje. Glavni utjecaj na infiltraciju imaju sekundarna i tercijarna poroznost koje omogućavaju tok vode kroz vodonosnik. U ovom slučaju promatrat ćemo pukotinsku poroznost te procijeniti njezinu fraktalnu dimenziju. Procjenom fraktalne dimenzije vršimo kvantifikaciju prostorne raspodjele pukotinskih sustava što predstavlja podlogu za razumijevanje toka podzemne vode kroz promatrani vodonosnik (GUREL et al., 2016).

Fraktalna dimenzija će se procjenjivati na temelju fotografija izdanaka u različitim mjerilu. Fotografije su karakterizirane s 2 dimenzije (duljina i širina) te su fraktalne dimenzije pukotinskih sustava na fotografijama u intervalu $1 < D < 2$, no dopušta se ekstrapolacija iznosa procijenjenih dimenzija u viši red (1D u 2D ili 2D u 3D) (MANDELBROT, 1983; BONNET et al., 2001; BARTON, u TURCOTTE & HUANG, 1995; VERBOVŠEK, 2009) odnosima:

$$D_{2-D} = D_{1-D} + 1 \quad 6.1.$$

$$D_{3-D} = D_{2-D} + 1 \quad 6.2.$$

Ovaj odnos omogućuje ekstrapolaciju fraktalnih dimenzija pukotinskih sustava definiranih iz 2D fotografija u viši red. Time se može dobiti informacija koliko pukotine ispunjavaju prostor.

6.1. Postupak obrade fotografija

Odabrane izdanke u dolini Slapnice smo fotografirali digitalnim fotoaparatom na način da je leća fotoaparata bila okrenuta relativno okomito na izdanak kako bismo dobili što vjerniju dvodimenzionalnu fotografiju, prikazali što veći broj pukotina te izbjegli sjenu ili kuteve kojima se veći broj pukotina skriva i ne može uočiti. Bilo je potrebno obratiti

pozornost na udaljenost od fotografiranog izdanka te prisutnu svjetlost koja je nužna za jasnije uočavanje pukotina, no i problematična ukoliko stvara velike sjene. Naime sjene otežavaju i onemogućavaju daljnju obradu fotografija jer se smanjuje uočljivost pukotina i samim time značajno može utjecati naprocijenjenu fraktalnu dimenziju pukotinskih sustava. Udaljenost fotografiranja nam je određivala mjerilo fotografija i samu razlučivost, tako imamo fotografije krupnog mjerila koje su reprezentativni prikaz iz kojeg su izdvojene fotografije sitnijeg mjerila sa što manjom prisutnošću sjena i vegetacije na kojima je izračunata fraktalna dimenzija.

Kako bi odredili fraktalnu dimenziju pukotinskih i rasjednih sustava, fotografije je potrebno prethodno obraditi. Fotografije su obrađivane u računalnom programu *Adobe Illustrator CS6* tako što je na fotografijama postavljen okvir te su prekriveni dijelovi izdanka obrasli vegetacijom ili mahovinom, izdvojene su otvorene pukotine te ono najvažnije za izračun fraktalne dimenzije, izvučeni su pukotinski sustavi na temelju svojih orijentacija. Nakon obrade fotografija, fotografije je bilo potrebno pretvoriti u binarne fotografije. Pretvaranje u binarne fotografije se provodilo računalnim programom *Adobe Illustrator CS6* i *Fiji ImageJ*. *Adobe Illustrator CS6* je služio za pretvaranje fotografija u sivi 8bit – ni spektar te pretvaranje vektorskih prikaza pukotina u rasterski prikaz. U programu *Fiji* pomoću namještanja opcije *Threshold* koja određuje prag između spektra boja, crni podaci su označavani i definirani binarnom jedinicom (1), a bijeli nulom (0), namještanjem praga, program *Fiji* automatizirano pretvara fotografiju u binarnu. Cilj obrade fotografija i njihovog pretvaranja u binarne fotografije, jest da one vjerno prikazuju pukotine gornjotrijaskih dolomita na pojedinim izdancima kao na primjeru prikazanom na fotografiji ispod (Slika 6 – 1.).



Slika 6-1. Usporedba fotografije izdanka i digitaliziranih trasa pukotina (GUREL et al., 2016).

Obrada fotografija u cijelom svom postupku zahtjeva predan rad. Izdvajanje pukotina i obradu je potrebno provesti ručno jer proces automatizacije je otežan i neizvediv zbog više faktora. Često puta neravne površine, vegetacija, sjene i ostalo stvaraju smetnje na fotografijama koje su često jednoličnih boja i kontrasta, čime su pukotine slabo uočljive, a automatizacija teško provediva. Isto tako pukotine je često vrlo teško uočiti zbog zapunjenosti glinom, zemljom, smrvljenom stijenom ili zbog vrlo male širine pukotina.

Izračun fraktalnih dimenzija iz obrađenih i pripremljenih fotografija će se procjenjivati računalnim programom *Fractalyse*.

Fraktalna dimenzija pukotina i pukotinskih sustava je vrijednost, tj. mjera kojom pukotine ispunjavaju prostor. Fraktalna dimenzija bliža dimenziji 3, ukazuje na veću gustoću manjih pukotina, dok fraktalna dimenzija bliža dimenziji 2, ukazuje na dominaciju manjeg broja većih pukotina. Fraktalna dimenzija će poslužiti i pri izradi DFN modela gdje služi kao ulazni parametar ako se raspodjela pukotina i njihovih značajki aproksimira pomoću "power – law" funkcije.

Pri samom dobivanju i računanju fraktalnih dimenzija postoje stvari koje potencijalno mogu značajno ili manje značajno smanjiti dobivene vrijednosti fraktalne dimenzije (BONNET et al. 2001):

- Veličina i rezolucija fotografije – mogu prikazati samo dio velikih i značajnih pukotina za fotografirani izdanak anedovoljna rezolucija, smanjiti uočljivost manjih pukotina
- Zasutost izdanka tlom ili zdrobljenom stijenom – prikriva dijelove izdanka te je nemoguće odrediti fraktalnu dimenziju zasutog izdanka
- Interpretacija – interpretator mora predano i strpljivo što vjernije prikazati vidljive pukotine, kako bi ulazna fotografija dala što precizniju i vjerniju vrijednost fraktalne dimenzije
- Vegetacija – prikriva veće dijelove izdanka te smanjuje mogućnost računanja fraktalnih dimenzija na sitnom mjerilu, često se dijelovi vegetacije ne mogu izbaciti iz područja računanja fraktalne dimenzije, te nastaju prazne rupe u podacima koje smanjuju fraktalnu dimenziju

- Kut fotografiranja – često radi kuta fotografiranja ne mogu se uočiti sve pukotine jer na fotografijama nerijetko ostaje velik prostor bez pukotina (npr. Kada slojna ploha zauzima veliki dio fotografije)

6.2. Metode mjerenja fraktalne dimenzije

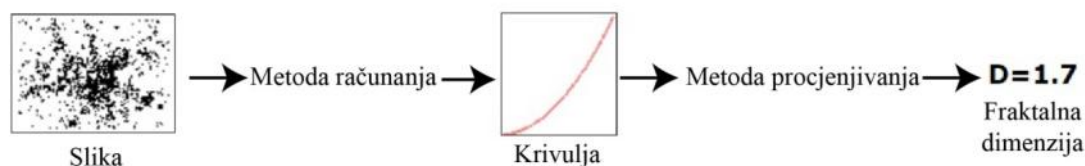
Računalni program *Fractalyse* obavlja procjenu fraktalne dimenzije različitim metodama koje odgovaraju različitim dimenzijama (Hausdorff – ova dimenzija). Proces mjerenja možemo podijeliti na dva dijela:

- Metoda računanja
- Metoda procjene

Metoda računanja se obavlja korak po korak na principu iteracije (Slika 6 – 2.). Svakim korakom iteracije računaju se i broje crni pikseli u prozoru za brojanje. Povećavajući stupnjeve iteracije i broj koraka, broj prozora za brojanje se povećava te se time mijenja rezolucija u kojoj se analiza fotografija. Svaka metoda ima dva elementa koja variraju temeljem koraka brojanja (stupnja iteracije i):

- Broj izbrojenih elemenata (približan broj crnih piksela prisutnih u fotografiji) - N
- Veličina okvira za prekrivanje fotografije ili referentnih elemenata ε

Na kraju dobivamo niz točaka koje se mogu grafički prikazati u log mjerilu. Na osi Y nalazi se broj elemenata N , a os X odgovara broju prozora za prekrivanje fotografije ili veličini referentnih elemenata ε koji se povećavaju svakim korakom iteracije.



Slika 6-2. Dijagram dobivanja fraktalne dimenzije (fractalyse.org).

Metoda procjenjivanja se sastoji od procjene krivulje koja se podudara sa skupom točaka, tj. empirijskom krivuljom, ta krivulja se naziva procijenjena krivulja. Ukoliko se ispostavi da je promatrani objekt na fotografiji fraktal, procijenjena krivulja ima oblik "power – law" funkcije (parabola ili hiperbola) te D predstavlja fraktalnu dimenziju.

$$N = \varepsilon^D \text{ ili } N = \varepsilon^{-D} \quad 6.3.$$

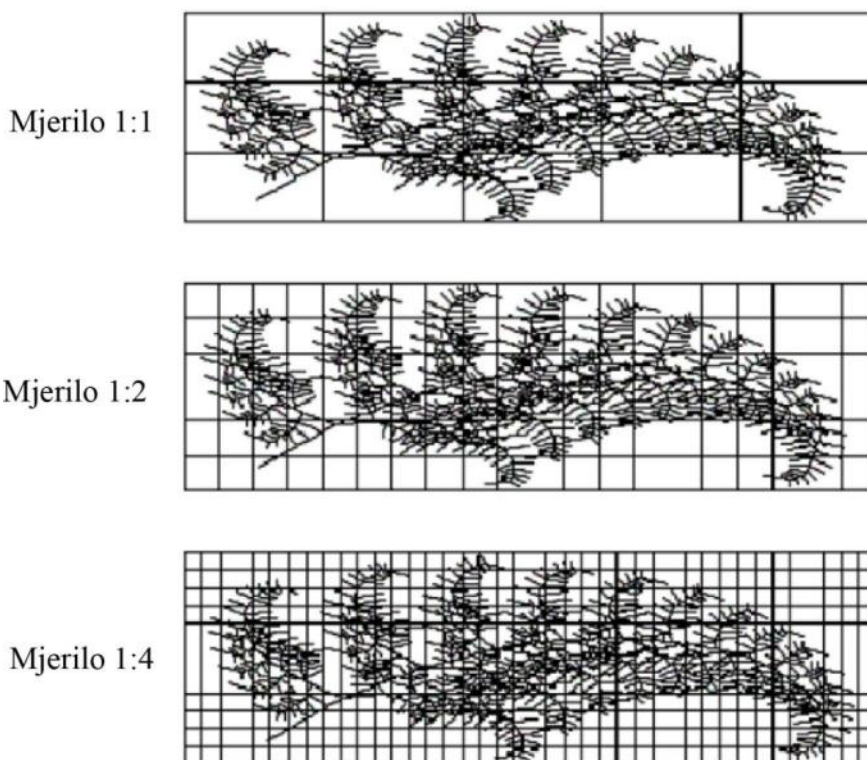
6.2.1. Metode računanja

6.2.1.1. „Grid“ metoda

Ovo je najčešće korištena metoda za procjenu fraktalne dimenzije. Slika se pokriva kvadratnom mrežom različitih dimenzija kvadrata(ε) (Slika 6 – 3.). Za svaku vrijednost ε broje se ćelije $N(\varepsilon)$ koje sadrže točke (piksele). Ova metoda predstavlja temelj "box – counting" metode:

$$D_{grid} = \frac{\log n(a) - \log n(b)}{\log\left(\frac{1}{s_a}\right) - \log\left(\frac{1}{s_b}\right)} \quad 6.4.$$

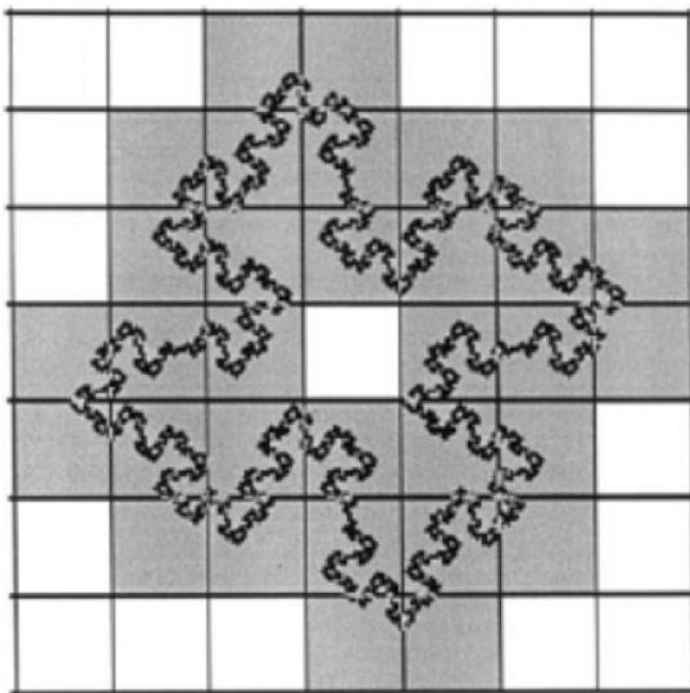
- $n()$ broj kvadrata koje slika sadrži
- $1/s$ mjerilo koordinatne mreže



Slika 6-3. Mjerenje paprati "Grid" metodom (wahl.org).

"Box – counting" metoda je metoda kojom smo procjenjivali fraktalne dimenzije fotografiranih izdanaka gornjotrijaskih dolomita Žumberačke gore. Kao i

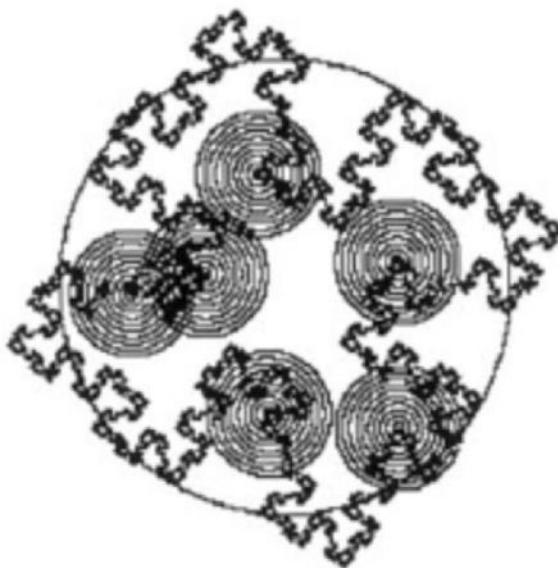
kod "*Grid*" metode sliku objekta ili objekt računalni program prekriva mrežom kvadrata različitih veličina (Slika 6 – 4.), a zatim uspoređuje veličinu mreže i broj kvadrata na najmanjem dijelu slike. Odnos između veličine mreže i broja ćelija koje prekrivaju objekt daju fraktalnu dimenziju.



Slika 6-4. Fraktalna analiza "Box - counting" metodom (wahl.org).

6.2.1.2. "Radius mass" metoda

Ova metoda se odnosi na određenu specifičnu točku koja se zove centar računanja koji daje zakon raspodjele zauzetih mjesta uokolo točke. Oko točke se crta radijus koji gradijentno raste (Slika 6 – 5.). U svakom koraku ukupan broj zauzetih piksela $N(\epsilon)$ unutar kružnice se prebrojava. Centar računanja i prebrojavanja određuje se proizvoljno.



Slika 6-5. Fraktalna analiza metodom "Radius mass" (wahl.org).

6.2.1.3. Metoda korelacije

Svaka točka na slici je omeđena malim kvadratom. Broj zauzetih piksela je prebrojan u svakom kvadratu te se time omogućava izračun srednjeg broja točaka (piksela) unutar određenog kvadrata. Ista operacija se provodi povećavanjem broja kvadrata. Os X predstavlja veličinu stranica kvadrata unutar kojeg se prebrojavaju pikseli $\varepsilon = (2i+1)$, dok os Y predstavlja srednju brojku izbrojanih točaka unutar kvadrata. Osim kvadrata za prebrojavanje moguće je uzeti bilo kakav oblik, no zbog kvadratnog oblika piksela to se izbjegava jer odabirom kvadrata izbjegavaju se moguće greške u obuhvatu točaka.

6.2.1.4. Metoda dilatacije

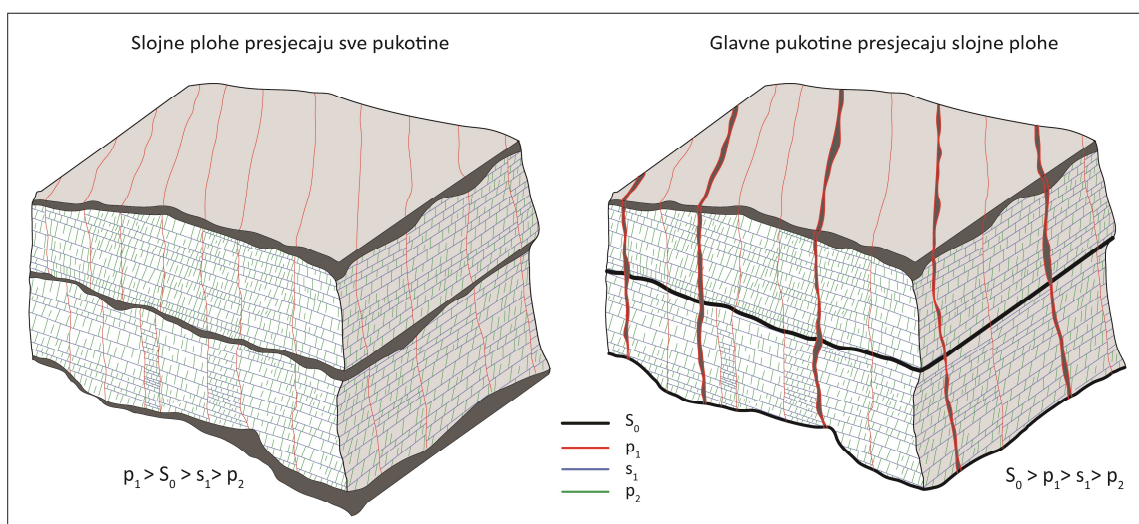
Metoda je temeljena na algoritmu koji određuje veličinu objekta koristeći pristup teorije mjerenja. Ovom analizom svaki zauzeti piksel okružen je kvadratom veličine ε za koji se smatra da mu je površina u potpunosti zauzeta. Veličina kvadrata se povećava, a detalji manji od ε se zanemaruju te postepeno dobivamo aproksimaciju originalnog oblika. Radi činjenice da se sve više kvadrata preklapa, ukupno zauzeta površina za određenu vrijednost ε je manja nego što bi bila kada bi isti broj zauzetih piksela koji tvore originalnu formu, bio okružen kvadratom samostalno za sebe. Podijelimo li ukupnu površinu s površinom kvadrata za testiranje (ε^2), dobivamo aproksimaciju broja elemenata $N(\varepsilon)$ potrebnih da prekriju cijelu površinu. Ovom metodom se granice i konture materije ili objekta proširuju te izgladuju (Slika 6 – 6.).



Slika 6-6. Fraktalna analiza metodom dilatacije (wahl.org).

6.3. Izračun fraktalnih dimenzija pukotinskih sustava na gornjotrijaskim dolomitima Žumberka

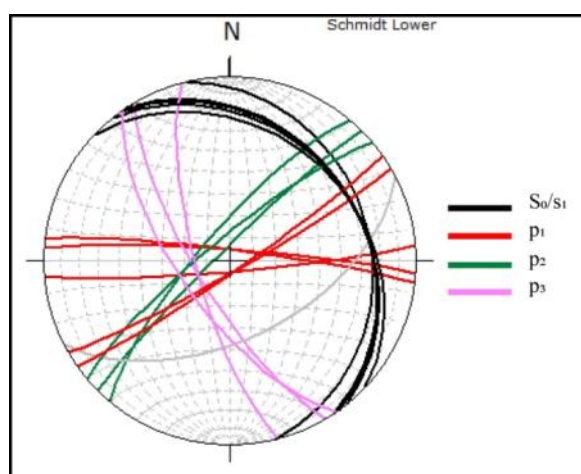
Terenskim istraživanjima u dolini Slapnice, utvrđeni su i fotografirani izdanci gornjotrijaskih dolomita s ciljem procjene fraktalne dimenzije pukotinskih sustava. Fotografirani izdanci se nalaze uz cestu od Medven Drage do izvora Slapnice te dalje do mjesta Kalje. Izdanci predstavljaju reprezentativne primjere pukotinskih sustava u dolomitima. U sklopu diskontinuiteta (slika 6 – 7.) glavne diskontinuitete mogu predstavljati slojne plohe S_0 (Slika 6 – 7a.) ili pukotine p_1 (Slika 6 – 7b.). Pukotine mogu biti otvorene i do 10 – ak cm te ispunjene zdrobljenim dolomitom do dimenzija pijeska (dolomitni grus). Osim toga otvorene pukotine su vrlo značajne kao zone infiltracije oborina u podzemlje. Gotovo svi izdanci karakterizirani su diskontinuitetima s_1 paralelnih slojevitosti koje se često podudaraju s stromatolitnom laminacijom. S njim se isprepliće pukotinski sustav p_2 koji predstavljaju pukotine okomite na slojeve a mogu i ne moraju biti paralelni pukotinama p_1 . Na pojedinim izdancima osim navedenih sustava pukotina postoje još i specifični sustavi pukotina, koji su promjenjive orijentacije od izdanka do izdanka. Orijentacije svih izmjerenih i navedenih setova pukotina su navedene u Tablici 6 – 1., a prikaz svih setova pukotina je vidljiv na stereogramu (Slika 6 – 8.).



Slika 6-7. Sklop diskontinuiteta na gornjotrijaskim dolomitima Žumberka (PAVIČIĆ in prep).

Tablica 6-1. Tablica svih točaka i setova diskontinuiteta.

Točka	Fotografija	Formacija	Set diskontinuiteta	Orijentacija
Točka 48	IMG 1796	<i>Slapnica</i>	S_0	76/25
Točka 48	IMG 1796	<i>Slapnica</i>	p_1	7/85
Točka 48	IMG 1796	<i>Slapnica</i>	p_2	175/85
Točka 48	IMG 1796	<i>Slapnica</i>	p_3	4/85
Točka 36	IMG 1935-1952	<i>Glavni dolomit</i>	S_0	56/28
Točka 36	IMG 1935-1952	<i>Glavni dolomit</i>	p_1	310/77
Točka 36	IMG 1935-1952	<i>Glavni dolomit</i>	s_1	56/28
Točka 36	IMG 1935-1952	<i>Glavni dolomit</i>	R_1	218/55/85
Točka 36	IMG 1935-1952	<i>Glavni dolomit</i>	R_2	330/65/45
Točka 36	IMG 1935-1952	<i>Glavni dolomit</i>	R_3	325/55/85
Točka 50	IMG 2012	<i>Glavni dolomit</i>	S_0	43/30
Točka 50	IMG 2012	<i>Glavni dolomit</i>	p_1	239/75
Točka 50	IMG 2012	<i>Glavni dolomit</i>	p_2	153/55
Točka 50	IMG 2012	<i>Glavni dolomit</i>	s_1	43/30
Točka 51	IMG 2032	<i>Glavni dolomit</i>	S_0	54/28
Točka 51	IMG 2032	<i>Glavni dolomit</i>	p_1	225/75
Točka 51	IMG 2032	<i>Glavni dolomit</i>	p_2	145/85
Točka 55	IMG 2110	<i>Glavni dolomit</i>	S_0	51/29
Točka 55	IMG 2110	<i>Glavni dolomit</i>	p_1	235/68
Točka 55	IMG 2110	<i>Glavni dolomit</i>	p_2	150/85



Slika 6-8. Stereogram svih sustava diskontinuiteta na istraživanim lokacijama.

Uvrštavanjem svih mjerenih sustava diskontinuiteta sa istraživanih točaka u stereogram (Slika 6 – 8.) vidljivo je da se diskontinuiteti mogu grupirati u četiri seta (S_0/S_1 , p_1 , p_2 i p_3). Crni tragovi predstavljaju setove S_0 i s_1 , to su slojne plohe te pukotine ili lamine koje su paralelne slojnim plohama. Zbog ujednačenog i većim djelom istog pružanja dvaju navedenih setova pukotina objedinjene su jednakim tragovima na svakom izdanku. Pukotinski sustav p_1 je većim dijelom okomit na slojne plohe S_0 i pukotine s_1 . Pukotine p_2 su na fotografijama često izvučene crvenom bojom jer fotografije prikazuju 1D,

gledajući okomito na izdanak često ne možemo vidjeti pružanje pukotina na slojnim plohama i samim time razdvojiti pukotinske sustave p_1 i p_2 . Pukotinski sustav p_3 je sustav koji se javlja kao kose pukotine na izdancima i nalaze se u vrlo malom broju.

6.3.1. Točka 48

Fotografije IMG_1796 (Slika 6 – 9.), IMG_1803, IMG_1808; (Prilozi 1, 2) prikazuju izdanke dolomita gornjeg trijasa, formacije *Slapnica*. Na fotografiji Slika 6 – 9. su vidljivi slojevi dolomita debljine 13 – 14 cm. Orijentacija slojne plohe S_0 je 76/25. Slojne pukotine u središnjem dijelu fotografije IMG_1796 (Slika 6 – 9.) su presječene dvjema većim pukotinama $p_1 = 7/85$ i $p_2 = 175/85$. Sljedeće važno obilježje su pukotine p_3 orijentacije 4/85, a završavaju na slojnim plohama, njihov prosječni razmak je 0,5 – 12 cm. Pukotine p_3 prate trend pukotina p_1 , što je vjerojatno posljedica jednakog uzroka nastanka tih dvaju setova. Samim time, možemo ih klasificirati i na fotografijama prikazati jednakom bojom. Pukotine p_1 , p_2 i p_3 na fotografiji IMG_1796 (Slika 6 – 10.) su prikazane jednakom bojom (Slika 6 – 10.) jer na fotografiji je nemoguće utvrditi pružanje pukotina koje su okomite na slojnu plohu. Slojne plohe prema fotografijama IMG_1803 (Prilog 1) i IMG_1808 (Prilog 2) su ravne do valovite te su izraženije u gornjim dijelovima. Mjestimično su otvorene u širini od 0,5 – 5 cm. Za fraktalnu analizu su uzete fotografije IMG_1803 i IMG_1808 (Prilozi 1, 2).



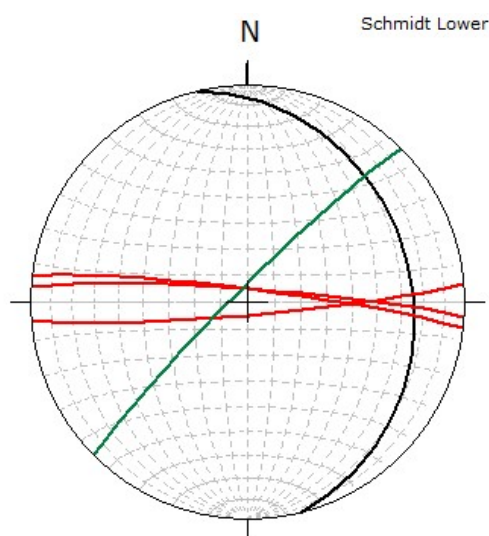
Slika 6-9. Fotografija izdanka, IMG_1796.



Slika 6-10. Obradena fotografija sa sklopom diskontinuiteta, IMG_1796.

Tablica 6-2. Tablica setova diskontinuiteta za Točku 48.

Set diskontinuiteta	Orijentacija diskontinuiteta	d –razmak između pukotina (cm)	z - Zijev (cm)
S_0	76/25	13 – 34	0,5 – 5
p_1	7/85	75 – 100	/
p_2	175/85	75 – 100	/
p_3	4/85	0,50 – 12	/



Slika 6-11. Stereogram diskontinuiteta na Točki 48.

Tablica 6-3. Vrijednosti fraktalnih dimenzija za Točku 48.

Fotografija	Formacija	Metoda analize	Fraktalna dimenzija (2D)	Fraktalna dimenzija (2D+1)
IMG_1803 (Prilog 1)	<i>Slapnica</i>	"Box – counting"	1,59	2,59
IMG_1808 (Prilog 2)	<i>Slapnica</i>	"Box – counting"	1,62	2,62

Fraktalne dimenzije pukotinskih sustava na analiziranim fotografijama Prilog 1 i Prilog 2, ukazuju na vrlo dobru i pravilnu raspodjelu pukotina. Vrijednosti 2,59 i 2,62 ukazuju na jednoliku raspodjelu sustava pukotina tj. niti jedan sustav se ne ističe posebno (Tablica 6 – 3.). Glavni su diskontinuiteti slojne plohe na kojima završavaju pukotine p_1 i p_2 no njihova brojnost i pravilna raspodjela po cijelom izdanku rezultiraju dobivenim fraktalnim dimenzijama. Na fotografiji IMG_1803 (Prilog 1) možemo uočiti kako gornji slojevi veće debljine imaju nešto nižu raspodjelu pukotina zbog veće kompaktnosti, dok niži slojevi imaju pravilniju raspodjelu pukotina koje su povezane s glavnim pukotinama.

Fotografija IMG_1808 (Prilog 2) koja ima nešto višu fraktalnu dimenziju ima relativno jednoličnu raspodjelu pukotina te je moguće uočiti i zijeve na pojedinim pukotinama. Velik broj manjih vertikalnih pukotina koje su okomite na slojne plohe, povećava fraktalnu dimenziju.

6.3.2. Točka 36

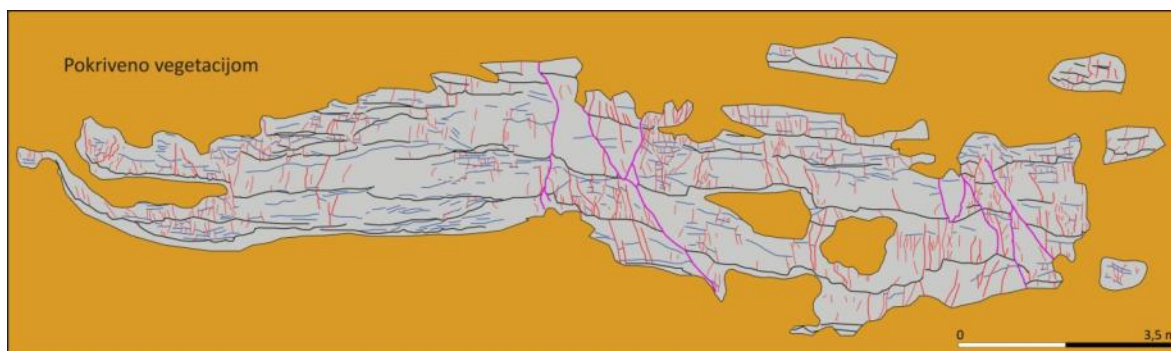
Točka 36 je izdanak debelouslojenih gornjotrijaskih dolomita – formacija *"Glavni dolomit"*. Debljine slojeva mogu dosezati i metarske dimenzije. Panoramska fotografija IMG_1935 – 1952 (Slika 6 – 12.) prikazuje izdanak u sitnom mjerilu dok ostale navedene fotografije prikazuju određene dijelove izdanka u krupnom mjerilu. Glavno obilježje izdanka je značajan rasjed R_1 koji je okomit na slojeve, tj. paralelan je sa cestom te ujedno i samom dolinom. Samim time izdanak predstavlja rasjednu plohu. Orijentacija rasjeda R_1 je 218/55/85 reversni lijevi.

Utvrđena su još dva rasjeda, rasjed R_2 orijentacije 330/65/45 koji je karakteriziran kao reversni desni s vertikalnim pomakom od oko 10 cm i rasjed R_3 IMG_1964 (Prilog 3) orijentacije 325/55/85 koji je karakteriziran kao reversni desni rasjed (Slika 6 – 13.).

Osim utvrđenih rasjeda značajni diskontinuiteti su slojne plohe koje su na nekim dijelovima otvorene nekoliko cm. Orijentacija slojnih ploha S_0 je 56/28, debljina slojeva 60 – 90 cm, a zijev na pojedinim mjestima je do 20 cm. Pukotine između slojeva su generalno nešto rjeđe, utvrđen set pukotina p_1 (Prilog 4 i 5) orijentacije 310/77 koje su izraženije na sjevernom dijelu izdanka u zoni širine 1 – 2 m. Razmak između pukotina je od 1,5 do 7 cm, a zijev na pojedinim pukotinama 0 – 2 cm. Na krajnjem sjevernom dijelu izdanka javljaju se izražene pukotine s_1 koje su paralelne sa slojevitosti te u pravilu završavaju na pukotinama p_1 , no poneke i sijeku pukotine p_1 te pukotine p_1 završavaju na njima. Analizirane su fotografije IMG_1964, IMG_1967, IMG_1970, IMG_1972 (Prilozi 3; 4; 5; 6).



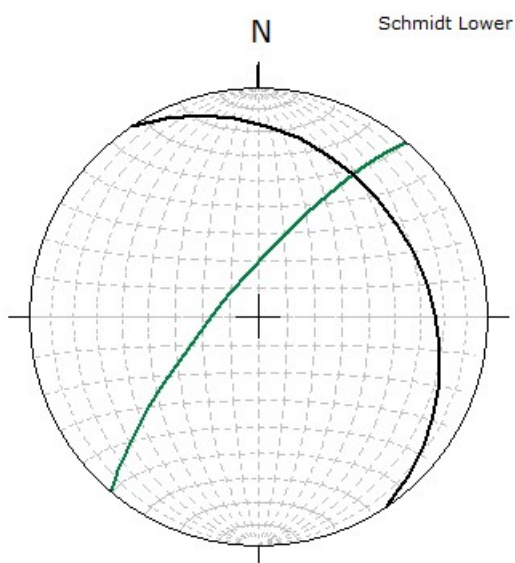
Slika 6-12. Fotografija izdanka, IMG_1935 – 1952.



Slika 6-13. Obradena fotografija sa sklopom diskontinuiteta, IMG_1935 – 1952.

Tablica 6-4. Setovi diskontinuiteta za Točku 36.

Set diskontinuiteta	Orijentacija diskontinuiteta	d – razmak između pukotina (cm)	z - Zijev (cm)
S_0	56/28	60 – 90	do 20
p_1	310/77	1,5 – 7	0 – 2
s_1	56/28	1 – 4	/
R_1	218/55/85	/	/
R_2	330/65/45	/	/
R_3	325/55/85	/	/



Slika 6-14. Stereogram diskontinuiteta na Točki 36.

Tablica.6-5. Tablica vrijednosti fraktalnih dimenzija za Točku 36.

Fotografija	Formacija	Metoda analize	Fraktalna dimenzija (2D)	Fraktalna dimenzija (2D+1)
IMG_1964	"Glavni dolomit"	"Box – counting"	1,57	2,57

(Prilog 3)				
IMG_1967 (Prilog 4)	<i>"Glavni dolomit"</i>	<i>"Box – counting"</i>	1,55	2,55
IMG_1970 (Prilog 5)	<i>"Glavni dolomit"</i>	<i>"Box – counting"</i>	1,54	2,54
IMG_1972 (Prilog 6)	<i>"Glavni dolomit"</i>	<i>"Box – counting"</i>	1,64	2,64

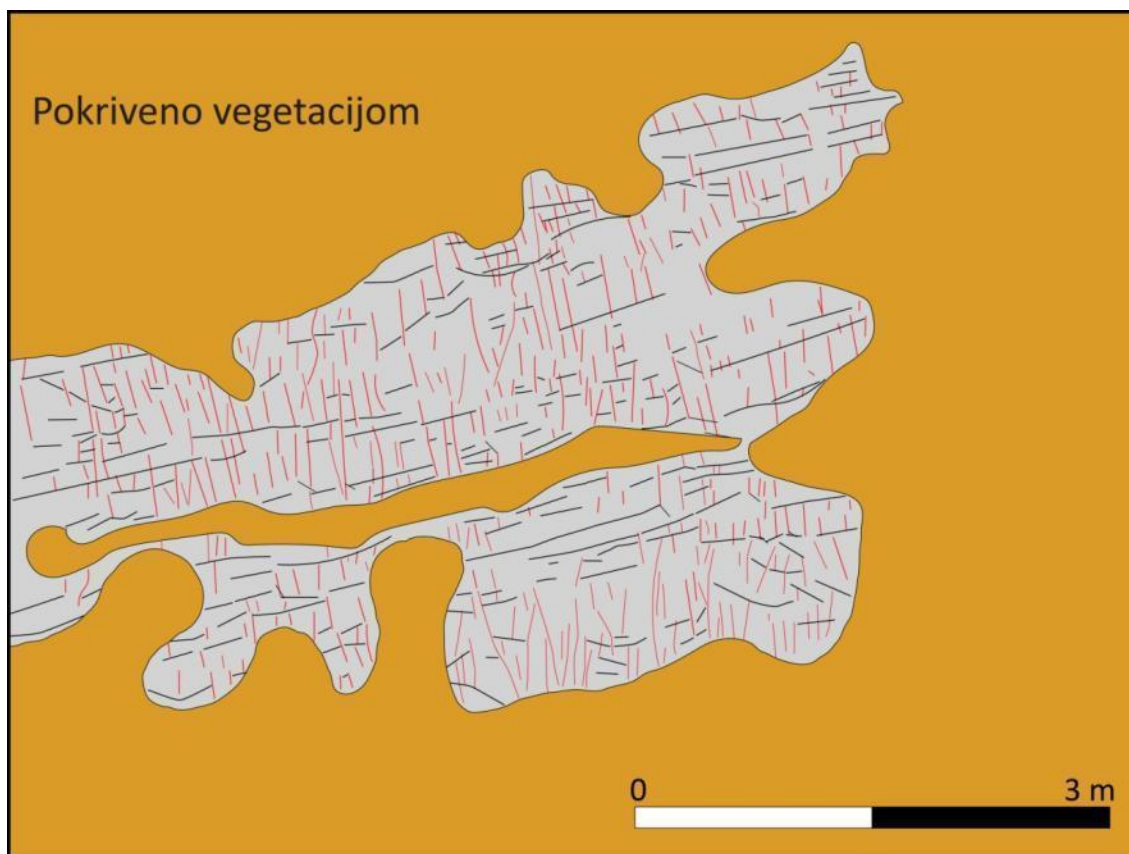
Vrijednosti fraktalnih dimenzija na izdanku se kreću u rasponu od 2,54 – 2,64 (Tablica 6 – 5.). Nešto manje vrijednosti fraktalne dimenzije na fotografijama IMG_1964, IMG_1967, IMG_1970 (Prilozi 3; 4; 5) su rezultat jačeg utjecaja velikih vertikalnih pukotina koje su vrlo značajne za infiltraciju vode u podzemlju. Unatoč nešto manjim vrijednostima, uočava se vrlo značajan broj malih pukotina s_1 , horizontalnih i često paralelnih slojevitošću. Najniža vrijednost fraktalne dimenzije procijenjena je za fotografiju IMG_1970 (Prilog 5) zbog većih područja prekrivenosti izdanka vegetacijom, ali i smanjene rezolucije i kompaktnosti izdanka čime se smanjuje broj pukotina i samim time pojavljuju bijele praznine na binarnim fotografijama koje smanjuju vrijednost fraktalne dimenzije.

6.3.3. Točka 50

Glavno obilježje izdanka gornjotrijaskih dolomita formacije "*Glavni dolomit*" su jasno vidljive slojne plohe S_0 , orijentacije 43/30 i razmaka od 28 – 60 cm, koje su presječene pukotinama p_1 orijentacije 239/75 i razmaka od 2 do 7 cm. Navedeno možemo uočiti na fotografiji IMG_2012 (Slika 6 – 15.; Slika 6 – 16.) koja prikazuje cjeloviti izdanak. Prisutne su i pukotine p_2 , orijentacije 153/55 te su paralelne s izdankom. Pukotine s_1 su orijentacije 43/30, a razmak među pukotinama je 10 – tak cm i paralelne su s slojevitosti, poradi čega se često preklapaju sa slojnom plohom (Slika 6 – 17.). Ukupna visina izdanka iznosi 3 – 4 m. Fotografije koje su uzete za analizu su IMG_2015, IMG_2016, IMG_2020 (Prilozi 7; 8; 9).



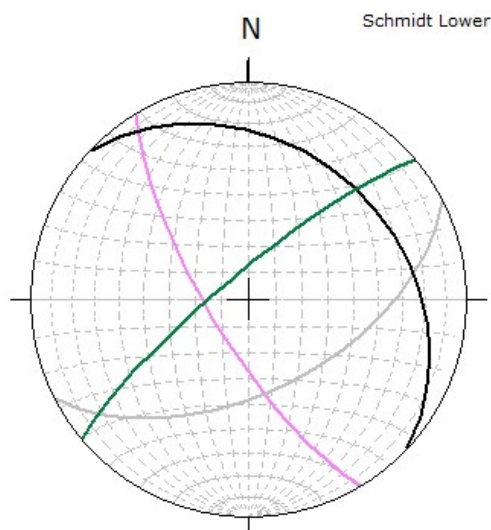
Slika 6-15. Fotografija izdanka, IMG_2012.



Slika 6-16. Obradena fotografija sa sklopom diskontinuiteta, IMG_2012.

Tablica 6-6. Tablica diskontinuiteta za Točku 50.

Set diskontinuiteta	Orijentacija diskontinuiteta	d – razmak između pukotina (cm)	z - Zijev (cm)
S_0	43/30	28 – 60	/
p_1	239/75	2 – 7	/
p_2	153/55	/	/
s_1	43/30	10	/



Slika 6-17. Stereogram diskontinuiteta na Točki 50.

Tablica 6-7. Vrijednosti fraktalnih dimenzija za Točku 50.

Fotografija	Formacija	Metoda analize	Fraktalna dimenzija (2D)	Fraktalna dimenzija (2D+1)
IMG_2015 (Prilog 7)	"Glavni dolomit"	"Box – counting"	1,61	2,61
IMG_2016 (Prilog 8)	"Glavni dolomit"	"Box – counting"	1,59	2,59
IMG_2020 (Prilog 9)	"Glavni dolomit"	"Box – counting"	1,56	2,56

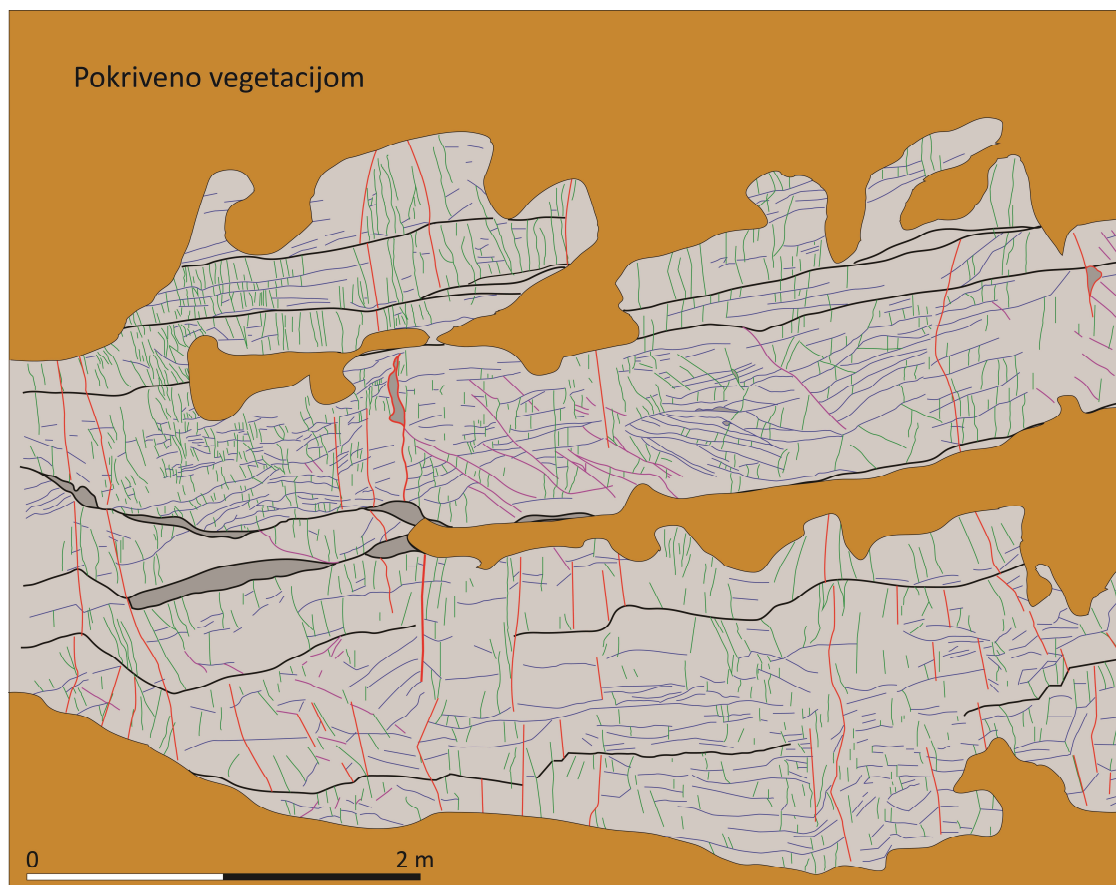
Fraktalne dimenzije (Tablica 6 – 7.) ovoga izdanka ukazuju na ujednačen utjecaj i (p_1) pukotina i slojnih ploha (S_0). Manje pukotine s_1 koje su prisutne u velikom broju te ukazuju na karakterističnu razlomljenost dolomita, su paralelne sa slojnim plohama te povećavaju raspodjelu pukotina i samim time fraktalnu dimenziju. Nešto niže vrijednosti fraktalne dimenzije na fotografiji IMG_2020 (Prilog 9) su razlog kompaktnosti tog dijela izdanka te znatne dominacije velikih vertikalnih pukotina. Povećane vrijednosti fraktalne dimenzije na fotografiji IMG_2015 (Prilog 7) su posljedica velike razlomljenosti izdanka osobito u središnjem dijelu koji je gotovo razdrobljen u pijesak.

6.3.4. Točka 51

Na ovom izdanku gornjotrijaskih dolomita IMG_2032 (Slika 6 – 18.), formacije "Glavni dolomit" su jasno vidljive slojne plohe S_0 , razmaka 15 – 30 cm i orijentacije 54/28. Na dvije izraženije slojne plohe pukotine p_1 završavaju dok ostale slojne plohe prema dnu izdanka pukotine p_1 i p_2 presijecaju, što je vidljivo na fotografiji IMG_2032 (Slika 6 – 19.). Orijentacija pukotina p_1 je 255/75, a razmak 2 – 10 cm, dok je orijentacija pukotina p_2 145/85, a razmak 2 – 15 cm. Fotografija uzeta za analizu je IMG_2040 (Prilog 10)



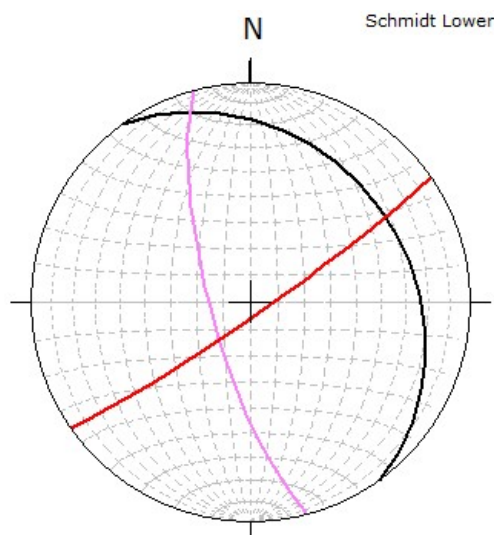
Slika 6-18. Fotografija izdanka, IMG_2032.



Slika 6-19. Obradena fotografija sa sklopom diskontinuiteta, IMG_2032.

Tablica 6-8. Tablica diskontinuiteta za Točku 51.

Set diskontinuiteta	Orijentacija diskontinuiteta	d – razmak između pukotina (cm)	z - Zijev (cm)
S_0	54/28	15 – 20	5 – 15
p_1	225/75	2 – 10	/
p_2	145/85	2 – 15	/



Slika 6-20. Stereogram diskontinuiteta na Točki 51.

Tablica 6-9.Vrijednosti fraktalnih dimenzija za Točku 51.

Fotografija	Formacija	Metoda analize	Fraktalna dimenzija (2D)	Fraktalna dimenzija (2D+1)
IMG_2040 (Prilog 10)	Glavni dolomit	"Box – counting"	1,64	2,64

Relativno visoke fraktalne dimenzije (Tablica 6 – 9.), koje su uobičajene za dolomite (Vrebovšek, 2009) ukazuju na vrlo pravilnu raspodjelu pukotina koje je uzrokovana velikim brojem pukotina p_2 i p_1 . Donji slojevi na fotografiji dijela izdanka su znatno razlomljeniji. Fraktalna dimenzija izdanka je nešto umanjena radi dijelova koji su bili prekriveni vegetacijom koja se u programu *Fractalyse* ne može izdvojiti izvan područja računanja tj. prekrivanja prozorima za računanje.

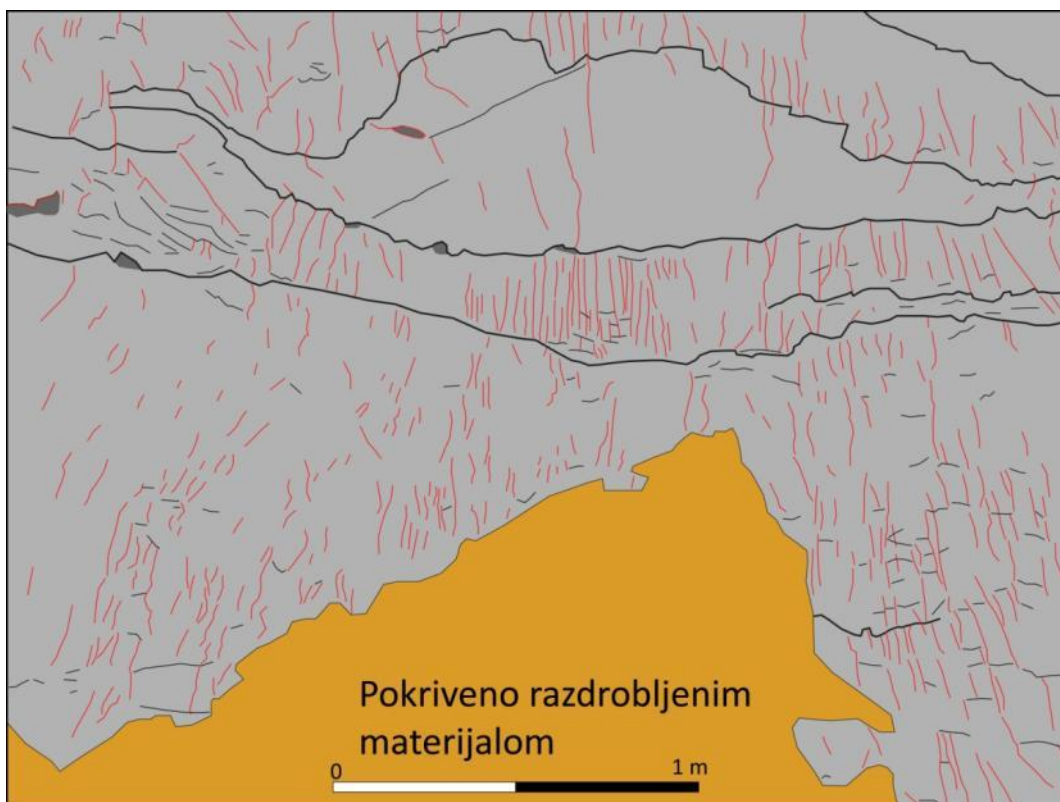
6.3.5. Točka 55

Fotografija IMG_2110 prikazuje izdanak relativno dobro uslojene dolomite formacije "*Glavni dolomit*" (Slika 6 – 21.). Na izdancima je uočeno više različitih setova pukotina koji su relativno dobro izraženi na cijelom izdanku (Slika 6 – 22.). Orijentacija slojnih ploha S_0 je 52/29, a debljina slojeva je oko 20 – 60 cm. Pukotine p_2 završavaju na slojnim plohama (IMG_2117; Prilog 11), orijentacije su 150/85, a razmaka su 1 – 6 cm. Slične su pukotinama p_1 , no razlika je što su pukotine p_2 nižeg reda. Pukotine p_1 su na nešto sjevernijem dijelu izdanka vrlo izražene i sijeku slojne plohe S_0 . Orijentacija pukotina p_1 je 235/68, razmak im je 40 – 60 cm, a na pojedinim mjestima se javlja zijev od 1,5 cm. Javlja se i pukotinski sustav p_3 koji prati trend pukotina p_2 no znatno su kraće te time i nižeg reda. Fotografije odabrane za analizu su IMG_2117, IMG_2119 i IMG_2121 (Prilozi 11; 12; 13).

$$p_1 < S_0 < p_2 < p_3$$



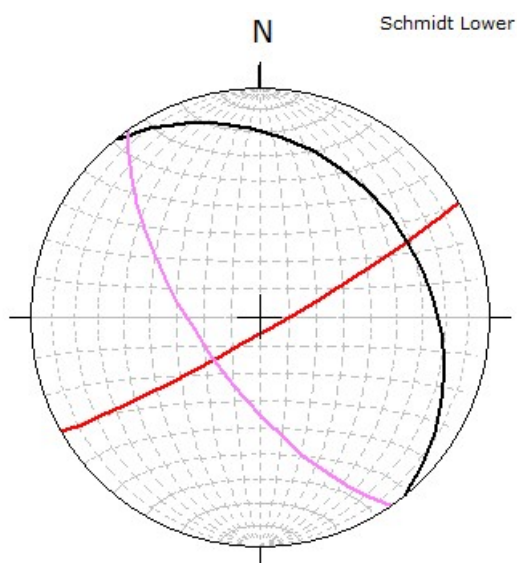
Slika 6-21. Fotografija Izdanka, IMG_2110.



Slika 6-22. Obradena fotografija sa sklopom diskontinuiteta, IMG_2110.

Tablica 6-10. Tablica diskontinuiteta za Točku 55.

Set diskontinuiteta	Orijentacija diskontinuiteta	d – razmak između pukotina (cm)	z - Zijev (cm)
S_0	51/29	20 – 60	/
p_1	235/68	40 – 60	1,5
p_2	150/85	1 – 6	/



Slika 6-23. Stereogram diskontinuiteta na Točki 55.

Tablica 6-11. Vrijednosti fraktalnih dimenzija za Točku 55.

Fotografija	Formacija	Metoda analize	Fraktalna dimenzija (2D)	Fraktalna dimenzija (2D+1)
IMG_2117 (Prilog 11)	<i>"Glavni dolomit"</i>	<i>"Box – counting"</i>	1,61	2,61
IMG_2119 (Prilog 12)	<i>"Glavni dolomit"</i>	<i>"Box – counting"</i>	1,67	2,67
IMG_2121 (Prilog 13)	<i>"Glavni dolomit"</i>	<i>"Box – counting"</i>	1,63	2,63

Fraktalne dimenzije pukotinskih sustava izdanka ukazuju na uniformnu raspodjelu pukotina svih sustava (Tablica 6 – 11.). Na fotografijama IMG_2117, IMG_2119 i IMG_2121 (Prilozi 11; 12; 13) su jasno uočljive pukotine p_1 koje svojom veličinom umanjuju vrijednosti fraktalne dimenzije, no isto tako pukotine p_2 svojom brojnošću, unatoč maloj veličini, povećavaju vrijednosti fraktalne dimenzije. Pukotine p_1 dominiraju zbog svoje veličine, što je vidljivo na fotografiji IMG_2117 (Prilog 11) gdje fraktalna dimenzija je nešto niža, dok na fotografiji IMG_2119 (Prilog 12), unatoč dominaciji velikih pukotina i diskontinuiteta, p_1 i S_0 , fraktalne vrijednosti su povišene zbog ravnomjerne i ujednačene raspodjele manjih i sitnijih pukotina. Na fotografiji IMG_2121 (Prilog 13) glavni diskontinuiteti su slojne plohe S_0 .

7. ZAKLJUČAK

Vrijednosti fraktalnih dimenzija u formaciji "*Glavni dolomit*" se kreće u rasponu od 2,54 do 2,67 te je osrednjena vrijednost za "*Glavne dolomit*" oko 2,60 (Tablica 6 – 12.). Vrijednosti fraktalne dimenzije formacije "*Slapnica*" se kreću u rasponu od 2,56 do 2,64 te je osrednjena vrijednost također oko 2,60 (Tablica 6 – 12.). Raspon vrijednosti fraktalne dimenzije je veći kod formacije "*Glavni dolomit*". Uspoređujući dobivene vrijednosti s vrijednostima idealnog modela fragmentacije od $D=2,59$ (STEACY & SAMMIS, 1995), dobivene vrijednosti su ili nešto manje ili nešto veće. Veće vrijednosti ukazuju na nešto veću prisutnosti i dobru raspodjelu većeg broja manjih pukotina u odnosu na manji broj većih pukotina. Dok nešto manje vrijednosti ukazuju na dominaciju i značajan utjecaj velikih pukotina koje su rezultat rasjedanja i rasjednih zona, čime je karakterizirano istraživano područje. Strukturna mjerenja sustava diskontinuiteta se vrlo malo razlikuju te se očekivano podudaraju.

Tablica 7-1. Tablica vrijednosti svih izračunatih fraktalnih dimenzija za istraživano područje

Točka	Fotografija	Formacija	Fraktalna dimenzija (2D)	Fraktalna dimenzija (2D+1)
48	IMG_1803	<i>Slapnica</i>	1,59	2,59
48	IMG_1808	<i>Slapnica</i>	1,62	2,62
36	IMG_1964	<i>"Glavni dolomit"</i>	1,57	2,57
36	IMG_1967	<i>"Glavni dolomit"</i>	1,55	2,55
36	IMG_1970	<i>"Glavni dolomit"</i>	1,54	2,54
36	IMG_1972	<i>"Glavni dolomit"</i>	1,64	2,64
50	IMG_2015	<i>"Glavni dolomit"</i>	1,61	2,61
50	IMG_2016	<i>"Glavni dolomit"</i>	1,59	2,59
50	IMG_2020	<i>"Glavni dolomit"</i>	1,56	2,56

51	IMG_2040	„Glavni dolomit“	1,64	2,64
55	IMG_2117	"Glavni dolomit"	1,61	2,61
55	IMG_2119	"Glavni dolomit"	1,67	2,67
55	IMG_2121	"Glavni dolomit"	1,63	2,63

Fraktalne dimenzije razlomljenih stjenskih masa su često niskih vrijednosti, što ukazuje na slabu raspodjelu pukotinskih sustava, dok u slučaju dolomita koji su često intenzivno razlomljeni to nije slučaj (VERBOVŠEK, 2009). Dobivene vrijednosti fraktalnih dimenzija ukazuju na vrlo dobru raspodjelu pukotina i ukazuju na značajke izdanaka koji su fotografirani.

Dobivene vrijednosti fraktalnih dimenzija računalnim programom *Fractalyse* te metodom računanja "*Box counting*". Dobivene vrijednosti 1D fraktalne dimenzije su oko $2,6 \pm 0,07$. Ovakav raspon vrijednosti fraktalnih dimenzija ukazuje da je prostorna raspodjela pukotinskih sustava na svim mjerenim točkama slična.

Pojedine vrijednosti 1D fraktalnih dimenzija se kreću u nešto nižim rasponima što je od 2,54 do 2,59. Fotografije izdanaka koje imaju veličinu fraktalne dimenzije u navedenom rasponu upućuju na dominaciju manjeg broja velikih pukotina koje zauzimaju veći dio prostora, unatoč prisutnosti vrlo velikom broju malih pukotina koje imaju ravnomjernu prostornu raspodjelu, što je i slučaj prema BARTON & LA POINTE 1995, koji kažu da je velikih pukotina nekoliko, a manjih sve više idući prema redovima manjih veličina. Osim toga snižene fraktalne dimenzije upućuju i na zasutost izdanaka sekundarnim materijalom koji je produkt trošenja i drobljenja tijekom tektonskih aktivnosti. Veliki setovi pukotina p_1 često su ispunjeni razdrobljenim pijeskom (dolomitni grus), prekrivanjem dijelova fotografije na kojima nije moguće interpretirati pukotinski sustav, dobivaju se nešto manje vrijednosti fraktalnih dimenzija. VERBOVŠEK, 2009 osim što je mjerio fraktalne dimenzije pukotinskih sustava mjerio je i fraktalne dimenzije toka podzemne vode na temelju pokusnih crpljenja iz bušotina te dobio vrijednosti od oko 2,11 što ukazuje da je tok kanaliziran kroz rasjedne zone ili veće pukotine u mjerilu izdanka. Time možemo zaključiti da manje fraktalne dimenzije ukazuju na težnju prema

kanaliziranom toku vode koji se odvija kroz manji broj velikih pukotina, nakon kojeg se odvija tok vode i procjeđivanje iz malih pukotina.

Veće vrijednosti 1D fraktalne dimenzije se kreću u rasponu od 2,60 do 2,67 ukazuju na dominantniji utjecaj većeg broja malih pukotina koje svojom ravnomjernom raspodjelom povećavaju vrijednosti fraktalnih dimenzija. Manji broj velikih pukotina koje su neravnomjerno raspodjeljene nemaju snažnog utjecaja unutar navedenog raspona vrijednosti. Isto tako povećana fraktalna dimenzija je karakteristična za kasnodijagenetske masivne dolomite koji imaju najveću veličinu kristala (VERBOVŠEK, 2009). Navedena svojstva čine ih podložnim intenzivnom frakturiranju, čime nastaje velik broj manjih pukotina koje su ravnomjerno raspodjeljene. Povećana fraktalna dimenzija

Fraktalna dimenzija pukotinskih sustava predstavlja mjeru kojim pukotine ispunjavaju prostor. Veće vrijednosti fraktalne dimenzije, odnosno vrijednosti bliže iznosu 3 (3D) ukazuje na veću gustoću i dominantan utjecaj manjih pukotina. Manja fraktalna dimenzija, bliža vrijednosti 2, ukazuje na dominaciju manjeg broja većih pukotina.

Računanjem fraktalnih dimenzija pukotinskih sustava gornjotrijaskih dolomita Žumberačke gore dobiven je temelj za izradu Discrete Fracture Network (DFN) modela kojim se sustavi pukotina mogu aproksimirati "power – law" funkcijom. DFN pretpostavlja da pukotinski sklop ima obilježja fraktala te da pukotinski sklop na fotografiranim izdancima ima prostornu raspodjelu koja se može opisati fraktalnom dimenzijom te aproksimirati "power – law" funkcijom. Dobivanjem DFN modela moguće je definirati sekundarnu poroznost koja je vrlo značajna za hidrogeološke karakteristike istraživanog područja.

LITERATURA

Objavljeni radovi:

1. AVANIĆ, R., GRGASOVIĆ, T., PAVELIĆ, D., ŠIMUNIĆ, AL. & KOVAČIĆ, M. 2000. Litostratigrafske jedinice donjeg trijasa na području Žumberka i Samoborske gore. 2. Hrvatski geološki kongres-Cavtat-Dubrovnik. Zbornik radova, 71-76 str. Zagreb
2. AVDIĆ, R., GRGASOVIĆ, T., PAVELIĆ, D., ŠIMUNIĆ, A., KOVAČIĆ, M. 2000. Litostratigrafske jedinice donjeg trijasa na području Žumberka i Samoborske gore. Zbornik radova 2. Hrvatski geološki kongres Cavtat-Dubrovnik 2000, Zagreb, pp. 71-77
3. BAČANI, A. 2006. Hidrogeologija 1. Sveučilište u Zagrebu. Rudarsko – geološko – naftni fakultet. Zagreb
4. BARKER, J.A. 1988. A Generalised Radial Flow Model for Hydraulic Tests in Fractured Rocks: Water Resour. Res., 1988, 24(10), 1796-1804.
5. BARTON, C. & LA POINTE, P.R. 1995. Fractals in the Earth Sciences. 265 str. Springer Science + Business Media, LLC, New York.
6. BOGNAR, A. 1980. Tipovi reljefa kontinentalnog dijela Hrvatske. Zbornik 30. Obilježnice Geografskog društva Hrvatske, Zagreb
7. BONNET, E., BOUR, O., ODLING, N. E., DAVY, P., MAIN, I., COWIE, P., BERKOWITZ, B. 2001. Scaling of fracture systems in geological media. Reviews of Geophysics, 39 (3), str. 347 – 383. American Geophysical Union.
8. BONNET, E., BOUR, O., ODLING, N.E., DAVY, P., MAIN, I., COWIE, P. & BERKOWITZ, B. 2001. Scaling of fracture system sin geological media. Reviews of Geophysics, 39, 3 / August 2001, pages 347–383.
9. BUKOVAC, J., GRGASOVIĆ, T., GLOVACKI JERNEJ, Ž., JERINIĆ, G., GALOVIĆ, I., PRTOLJAN, B., 1995. Litostratigrafska raščlamba dolomitnih naslaga jugozapadnog Žumberka u okviru radova na geološkoj karti Republike Hrvatske 1:50 000. Zbornik radova 1. Hrvatskog geološkog kongresa Opatija, Zagreb, pp. 137-143.
10. BUKOVAC, J., GRGASOVIĆ, T., GLOVACKI JERNEJ, Ž., JERINIĆ, G., GALOVIĆ, I. & PRTOLJAN, B. 1995. Litostratigrafska raščlamba dolomitnih naslaga trijasa jugozapadnog Žumberka u okviru radova na Geološkoj karti Republike Hrvatske 1:50.000.- U: VLAHOVIĆ, I., VELIĆ, I. & ŠPARICA, M.

- (ur.) 1995. I. hrvatski geološki kongres (First Croatian Geological Congress), Zbornik radova (Proceedings), 1, 137-142, Zagreb.
11. BUZJAK, N. 2001. Speleološke pojave Parka prirode „Žumberak-Samoborsko gorje“, 1. dio. Fond stručne dokumentacije Parka prirode „Žumberak-Samoborsko gorje“, Slani Dol.
 12. DAVY, P. BOUR, O., DE DREUZY, J.-R. & DARCEL, C. 2006. Flow in multiscale fractal fracture networks. Geological Society London Special Publications, 2006. DOI: 10.1144/GSL.SP.2006.261.01.03.
 13. DIMITRIJEVIĆ, M. 1982. Dinarides: An Outline of the Tectonics. Earth Evol. Sciences, 1. pp. 4 – 23.
 14. FALCONER, K. 2014. Fractal Geometry, Mathematical Foundations and Applications. Third edition, 368 str, John Wiley & Sons LTD.
 15. FORD, D. C. & GARNIER, J.M. 1979. Determination of the initial ^{14}C activity of the total dissolved carbon: A review of existing models and a new approach. Water Resources Research, 15, 399 – 413
 16. FRANGEN, T. 2013. Određivanje značajki krškoga vodonosnika na području jugozapadnoga Žumberka kvantitativnim trasiranjem u različitim hidrološkim uvjetima. Disertacija, RGNF, Sveučilište u Zagrebu, 204 str.
 17. GOLDSCHIEDER, N. i Drew, D. 2007. Methods in Karst hydrogeology, Leiden, Taylor & Francis
 18. GORJANOVIĆ-KRAMBERGER, D. 1894. Geologija gore Samoborske i Žumberačke. Rad JAZU, knjiga CXX, Zagreb, pp. 7 – 82.
 19. GORJANOVIĆ-KRAMBERGER, D. 1894a. Geološka prijedlogna karta gore Samoborske i Žumberačke, 1:75 000. JAZU, Zagreb.
 20. GRGASOVIĆ, T. 1998. Stratigrafija gornjotrijaskih naslaga Žumberka. Magistarski rad. Geološki odsjek Prirodoslovno – matematičkog fakulteta sveučilišta u Zagrebu
 21. GRUBIĆ, A. 1980. Yugoslavia. An Outline of the Geology of Yugoslavia. 26th Intern. Geol. Congr. Paris. Nat. Comm. miner. Resources of Yugoslavia, p. 97.
 22. GUREL, E., COSKUNER, Y.B. & AKIN, S. 2016. Fractal modeling of outcrop fracture patterns in Alasehir Geothermal Reservoir Turkey. PROCEEDINGS, 41st Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, Stanford, California, February 22-24, 2016. SGP-TR-209.

23. HAAS, J., KOVACS, S., KRYSRTYN, L., LEIN, R. 1995. Significance of Late Permian – Triassic facies zone in terrain reconstructions in the Alpine – North Pannonian domain. *Tectonophysics*, 242, pp. 19 – 40.
24. HACQUET; B. 1784. *Oryctographia carniolica, oder physikalische Erdbeschreibung des Herzogthums Krain, Istrien und zum Theil der benachbarten Länder. III Teil*, Leipzig.
25. HERAK, M. 1956. Geologija Samoborskog gorja. *Acta geologica* 1, JAZU, Zagreb.
26. HERAK, M. 1986. A new concept of geotectonics of the Dinarides. *Acta Geologica*, 16/1, (Prirodoslovna istraživanja, 53), Zagreb, pp. 1-42.
27. HERAK, M. 1947. Prilog stratigrafskom rasčlanjivanju mezozojskih naslaga jugozapadnog dijela Žumberačke gore. *Geološki Vjesnik* 1., Zagreb, pp. 3 – 5.
28. HERAK, M. 1991. Dinaridi – mobilistički osvrt na genezu i strukturu. *Acta Geologica*, 21/2, (Prirodoslovna istraživanja, 63), Zagreb, pp 1 – 83 (35 – 117)
29. HERAK, M., JAMIČIĆ, D., ŠIMUNIĆ, A., BUKOVAC, J. 1990. The northern boundary of the Dinarides (Sjeverna granica Dinarida), *Acta Geologica*, 20/1, (Prirodoslovna istraživanja, 60), Zagreb, pp. 5-27.
30. HRELIĆ, Đ., ČAKARUN, I., ŠARIN, A. 1994. Hidrogeološka karta Republike Hrvatske, mjerilo 1: 200 000, list Celje-karta i tumač. *Inst. geol. istr.*, Zagreb.
31. KÖPPEN, W., 1918. Klassifikation der Klimate nach Temperatur, Niederschlag und Jahresablauf. *Petermanns Geogr. Mitt.*, 64, 193-203, 243-248.
32. MANDELROT. B 1967. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension. *Science*: 156, 1967, 636-638.
33. MANDELROT. B 1982. *The Fractal Geometry of the Nature*. 468 str. W.H. Freeman and Company, New York.
34. MIOČ, P. 1982. Tektonski odnosi Savske navlake prema susjednim jedinicama u Sloveniji te njena veza sa širim jugoslavenskim područjem. *Geol. geofiz. prouč. preg. zone Dinarida*. Zagreb, pp. 33 – 39.
35. PAMIĆ, J. 1993. Eoalpine to Neoalpine magmatic and metamorphic processes in the northwestern Vardar Zone, the easternmost Periadriatic Zone and the southwestern Pannonian Basin. *Tectonophysics*, 226, pp. 503 – 518.
36. PAMIĆ, J., TOMLJENović, B. 1998. Basic geologic data from the Croatian part of the Zagorje – Mid – Transdanubian Zone. *Acta Geol. Hungarica*, 41/4, pp. 389 – 400.

37. PARLOV, J. 2015. Hidrogeologija krša. Skripta za akademsku godinu 2015/2016. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb.
38. PETKOVIĆ, K. 1958. Neue Erkenntnisse über den Bau der Dinariden. Jahrb. Geol. Bundesanst, 101, pp. 1 – 24.
39. PLENIČAR, M., PREMUR, U., HERAK, M. 1975. Osnovna geološka karta SFRJ, 1:100 000, list Novo Mesto L 33-79, Geološki zavod Ljubljana, Beograd.
40. PLENIČAR, M., PREMUR, U., HERAK, M. 1975. Osnovna geološka karta SFRJ, 1:100 000, Tumač za list Novo Mesto L 33-79, Geološki zavod Ljubljana, Beograd
41. PRELOGOVIĆ, E. 1969. Neotektonska kretanja u području između Orlice, Samoborske gore i Medvednice. Magistarski rad, PMF, Sveučilište u Zagrebu.
42. PRTOOLJAN, B. 2001. Relationships of thrust – fold and horizontal mechanisms of the Mt. Žumberak part of the Sava nappe in the northwestern Dinarides, West Croatia. Acta Geologica Hungarica, Vol. 44/1, pp. 67 – 80.
43. SALVADOR, A. (ed.) 1994. International stratigraphic guide: a guide to stratigraphic classification, terminology, and procedure. Second edition.- International Union of Geological Sciences, Trondheim & Geological Society of America, Boulder.
44. ŠARIN, A., BAHUN, S., FRITZ, F., KRANJEC, V., URUMOVIĆ, K. 1980. Hidrogeološka karta SR Hrvatske, mjerilo 1:500 000. Tumač. Inst. Geol. Istr., Zagreb.
45. ŠIKIĆ, K., BASCH, O., ŠIMUNIĆ, A. 1977. Osnovna geološka karta SFRJ, 1:100 000, list Zagreb L 33-80, Institut za geološka istraživanja Zagreb, Savezni geološki zavod Beograd.
46. ŠIKIĆ, K., BASCH, O., ŠIMUNIĆ, A. 1977. Osnovna geološka karta SFRJ, 1:100 000, Tumač za list Zagreb L 33-80, Institut za geološka istraživanja Zagreb, Savezni geološki zavod Beograd.
47. ŠUKLJE, F. 1944. Prilog stratigrafiji Samoborske gore. Vjesnik Hrvatskog Državnog Geološkog Zavoda i Hrvatskog geološkog muzeja, 1, Zagreb, pp. 104 – 106.
48. TCHALENKO, J. S. 1970. Similarities between shear zones of different magnitudes. Geological Society of America Bulletin, 81, 1625-1640.
49. TOMLJENOVIĆ, B. 2000. Kinematske značajke srednje miocenske ekstenzije u području Samoborskog gorja. Zbornik radova 2. Hrvatskog geološkog kongresa Cavtat-Dubrovnik, Zagreb, pp. 433-440.

50. TOMLJENović, B. 2002. Strukturne značajke Medvednice i Samoborskog gorja. Doktorska disertacija, RGNF, Sveučilište u Zagrebu.
51. TURCOTTE, D.L. & HUANG, J. 1995. Fractal Distributions in Geology, Scale Invariance, and Deterministic Chaos. Chapter 1 iz
52. TURCOTTE, D.L. 1997. Fractals and Chaos in Geology and Geophysics. Second edition, 398 str. Cambridge University Press, New York.
53. VERBOVŠEK, T. 2009. Extrapolation of fractal dimensions of natural fracture networks from one to two dimensions in dolomites in Slovenia. GeosciencesJournal. Vol 13, No. 4, p 343-351. Association of Korean Geoscience Societies and Springer, 2009.
54. VERBOVŠEK, T., 2009. Influences of Aquifer Properties on Flow Dimensions in Dolomites. Ground Water, 47, 660–668, DOI:10.1111/j.1745-6584.2009.00577.x.
55. VUJNOVIĆ, T. 2010. Hidrogeološke značajke Parka prirode „Žumberak-Samoborsko gorje“. Doktorska disertacija, RGNF, Sveučilište u Zagrebu.

Neobjavljeni radovi:

56. BAHUN, S. 1994. Hidrogeološki odnosi na području Sošica. Fond stručne dokumentacijePMF, Zagreb
57. BRKIĆ, Ž., KUHTA, M., SINGER, D. 2002. Geološka i hidrogeološka osnova Parka prirode „Žumberak-Samoborsko gorje“. Fond stručne dokumentacije Parka prirode „Žumberak-Samoborsko gorje“, Slani Dol.
58. ČAKARUN, I. & KUHTA, M. 1987. Inženjerskogeološka i hidrogeološka podloga idejom projektu brane „Koretići“. Fond stručne dokumentacije IGI, Zagreb.
59. DELIĆ, D. & TOPOLKO, S 1994. Stanje i smjernice razvoja vodoopskrbe područja Žumberak. Fond stručne dokumentacije Javno vodoprivredno poduzeće Karlovac.
60. DELIĆ, D. 1973. Konceptijsko rješenje vodoopskrbe dijela Žumberka. Fond stručne dokumentacije Direkcija za Savu-Zagreb, Odjeljak Karlovac
61. DRAGIČEVIĆ, I. & MAYER, D. 1998. Elaborat o zonama sanitarne zaštite i mjerama zaštite izvora Rijeka, Bazgovka, Sošice, Mačine i Vratimnica (Žumberak). Fond stručne dokumentacije GEOECO-ING, Zagreb.

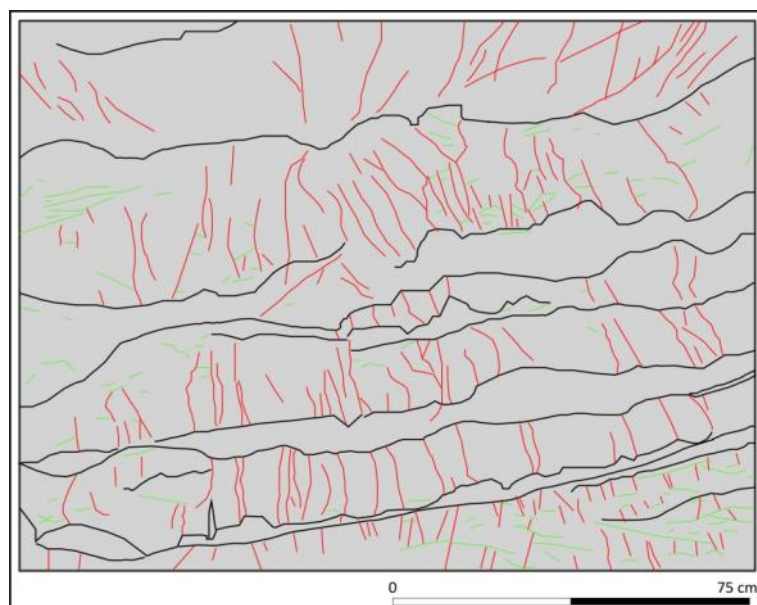
62. DRAGIČEVIĆ, I., BLAŠKOVIĆ, I., MAYER, D., ŽUGAJ, R., TOMLJENović, B. 1997. Gorski i prigorski vodonosnici sjeverne Hrvatske (izvješće o radovima u 1996. Godini). Fond stručne dokumentacije RGNF, Zagreb.
63. DRAGIČEVIĆ, I., BLAŠKOVIĆ, I., MAYER, D., ŽUGAJ, R., TOMLJENović, B. 1997a. Gorski i prigorski vodonosnici sjeverne Hrvatske (izvješće o radovima u 1997. Godini). Fond stručne dokumentacije RGNF, Zagreb.
64. PAVIČIĆ, I. in prep. Geneza, prostorna raspodjela i kvantifikacija poroznosti Žumberačkih gornjotrijaskih dolomita. Doktorska disertacija. RGN fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb.

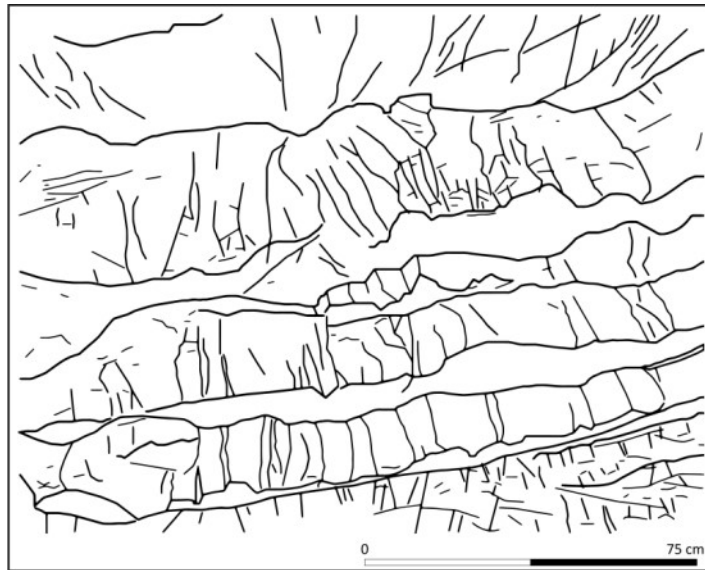
Internet izvori:

65. http://klima.hr/klima_arhiva.php 10.5.17., 17:40
66. http://web.env.auckland.ac.nz/our_research/karst/#karst1 13.06.2017. 23:45
67. <http://www.fractalyse.org/en-docall.html> 23.05.2017 15:00
68. http://www.wahl.org/fe/HTML_version/link/FE4W/c4.htm 24.05.2017. 9:20
69. https://www.researchgate.net/figure/222493018_fig3_Fig-3-Fractal-analysis-methods-A-Calliper-method-B-Box-count-ing-method-C 24.05.2017. 10:20

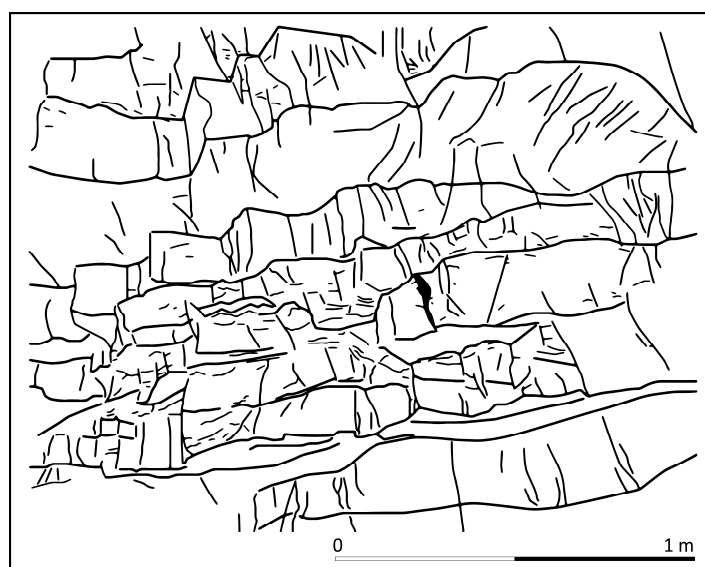
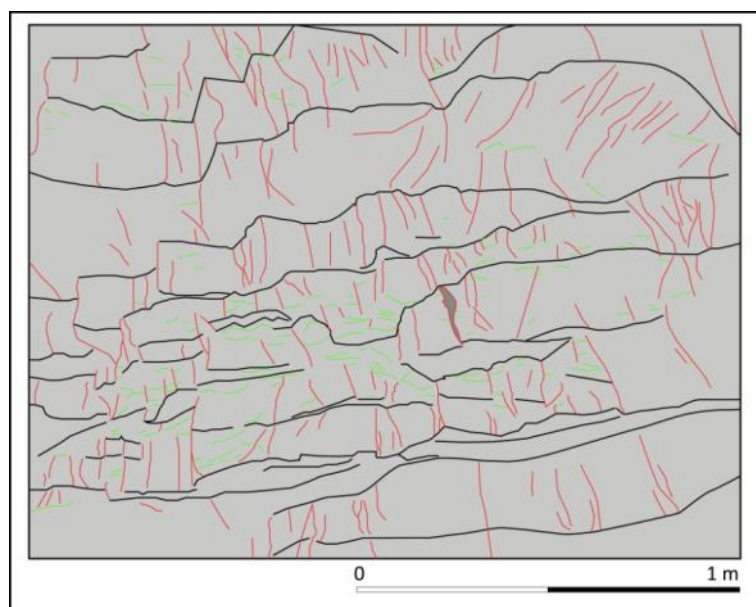
Prilozi

PRILOG 1 (IMG_1803)

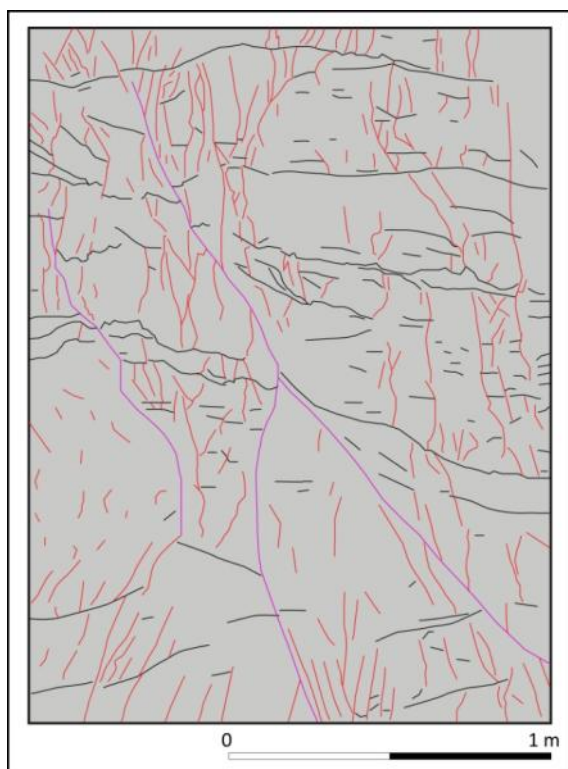


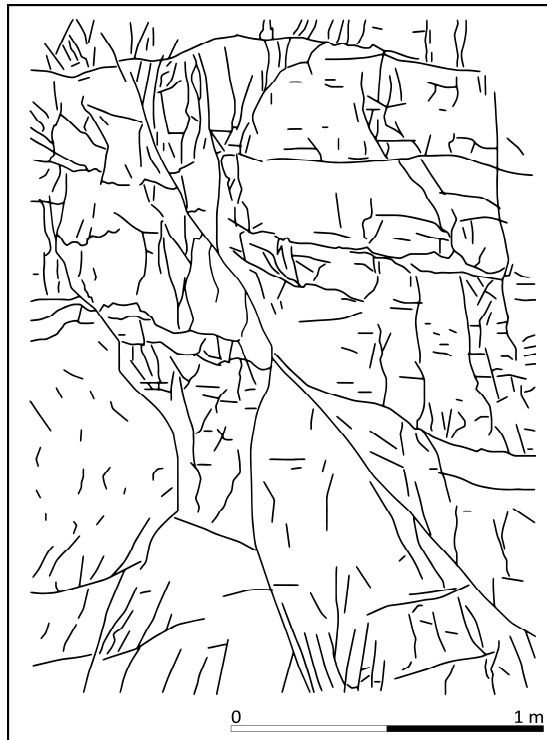


PRILOG 2 (IMG_1808)

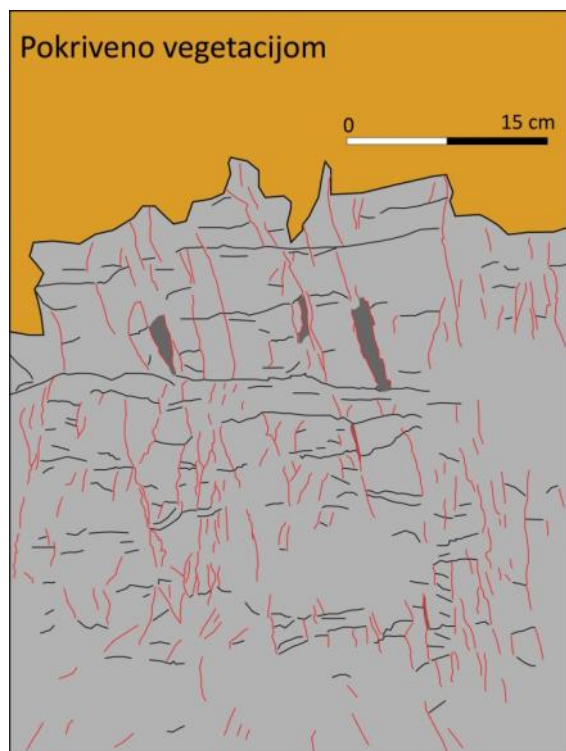


PRILOG 3 (IMG_1964)





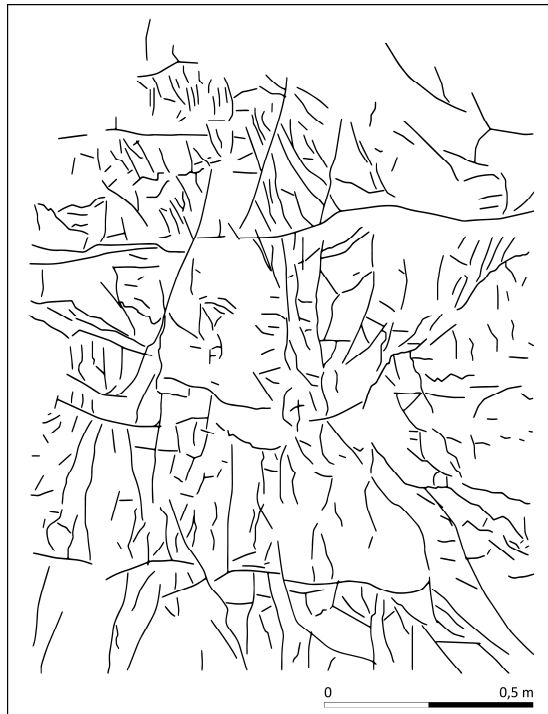
PRILOG 4 (IMG_1967)





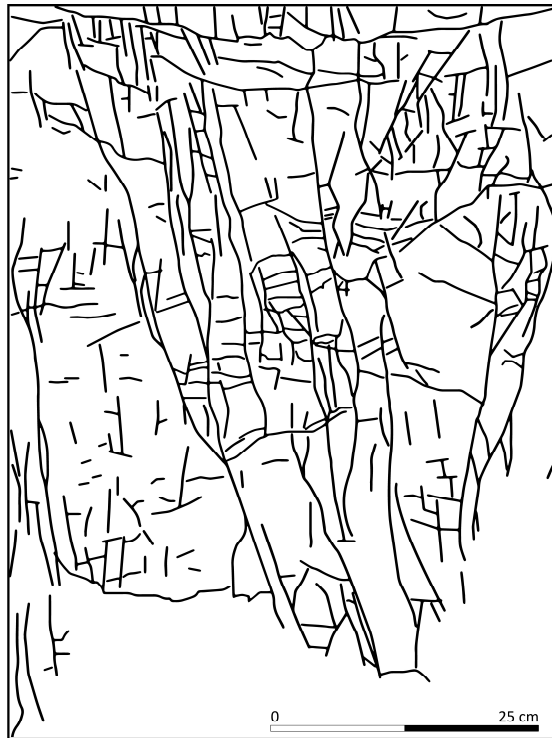
PRILOG 5 (IMG_1970)



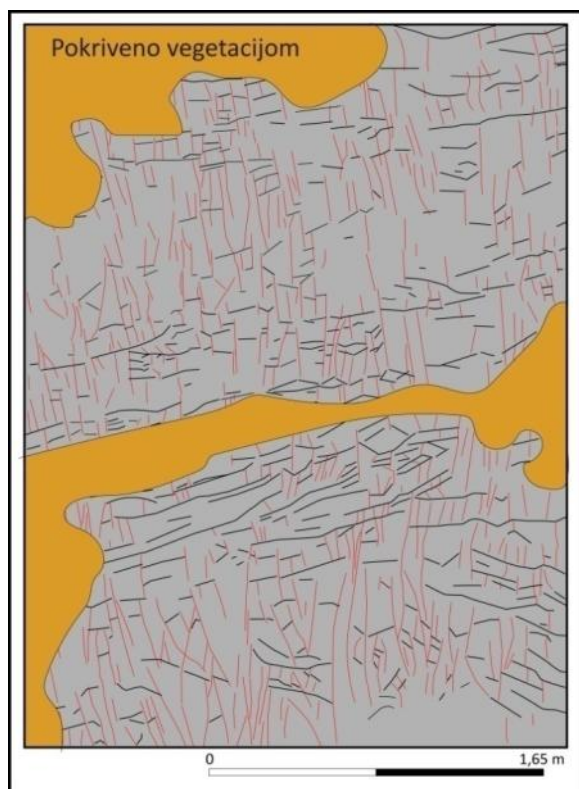


PRILOG 6 (IMG_1972)



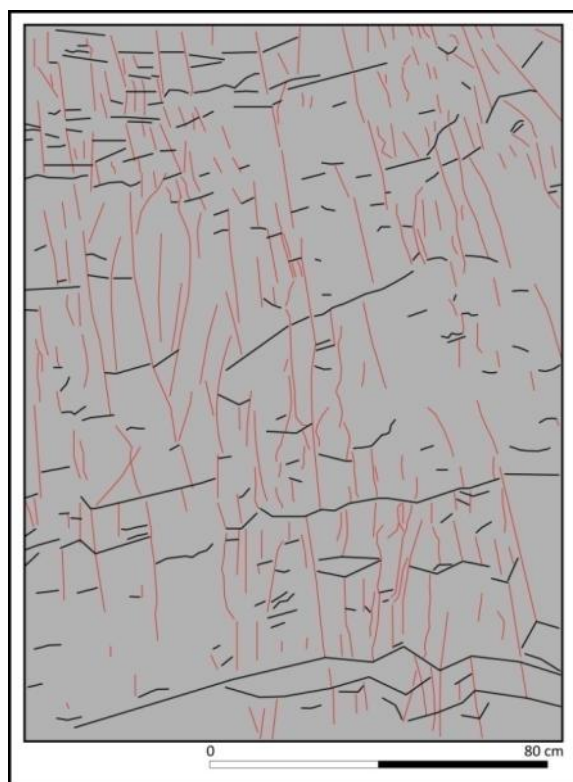


PRILOG 7 (IMG_2015)



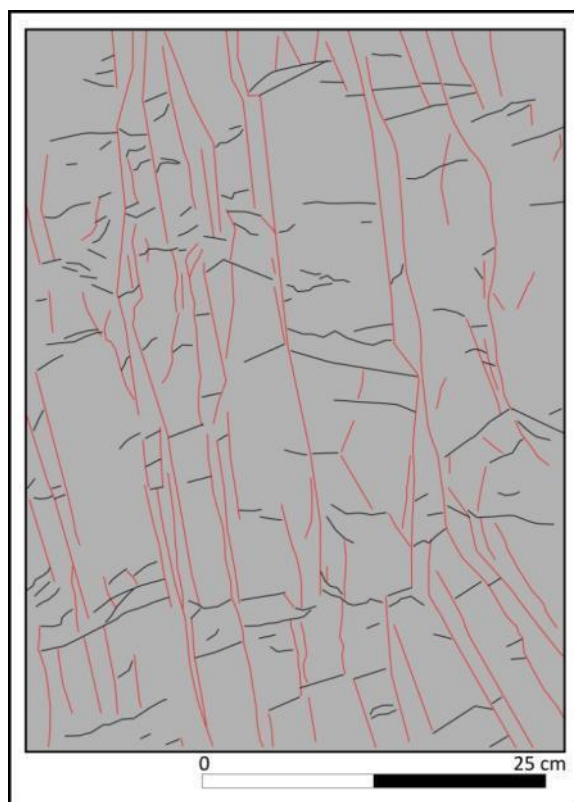


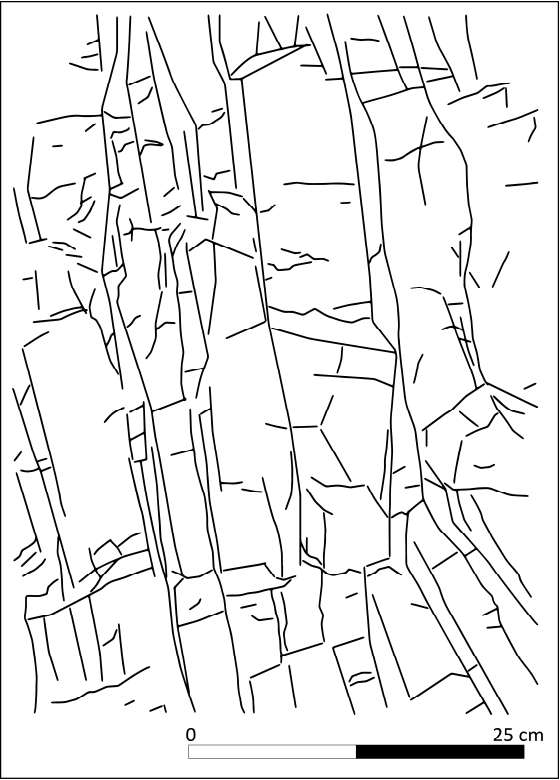
PRILOG 8 (IMG_2016)





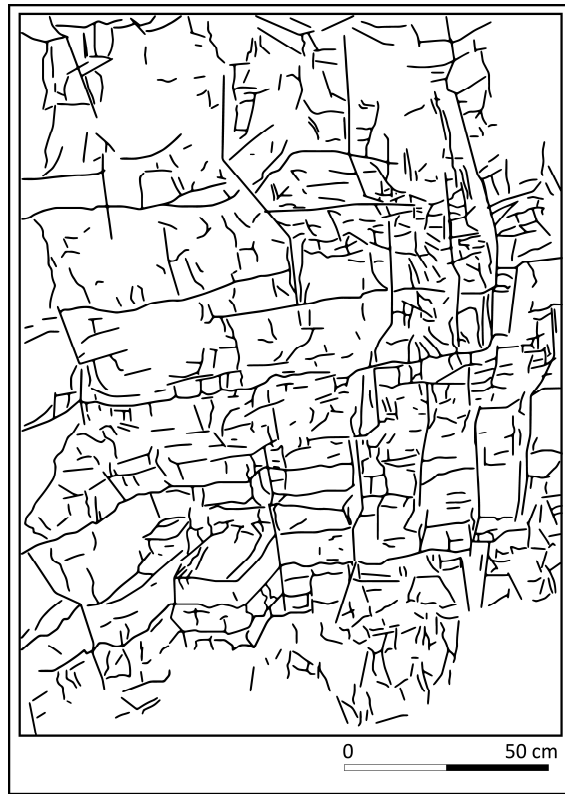
PRILOG 9 (IMG_2020)



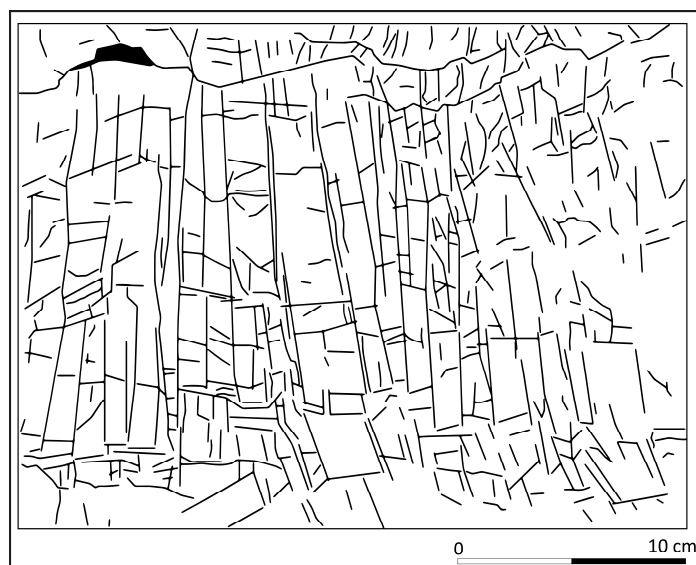
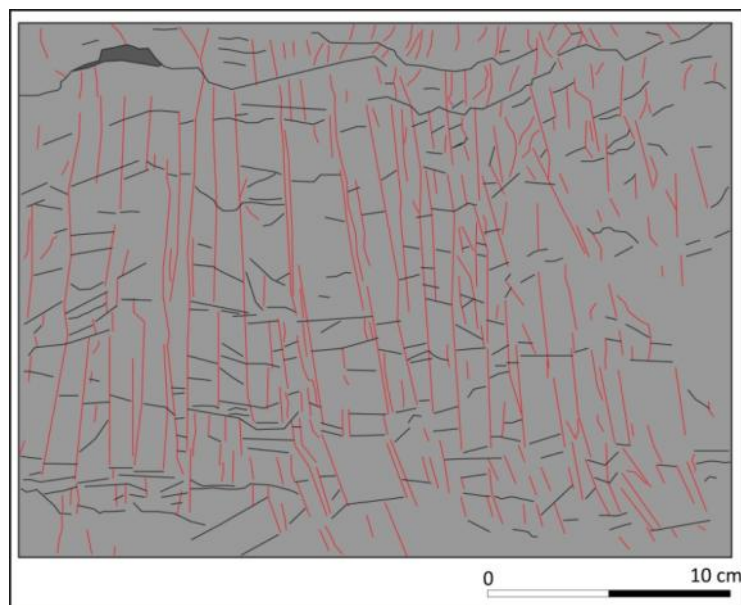


PRILOG 10 (IMG_2040)

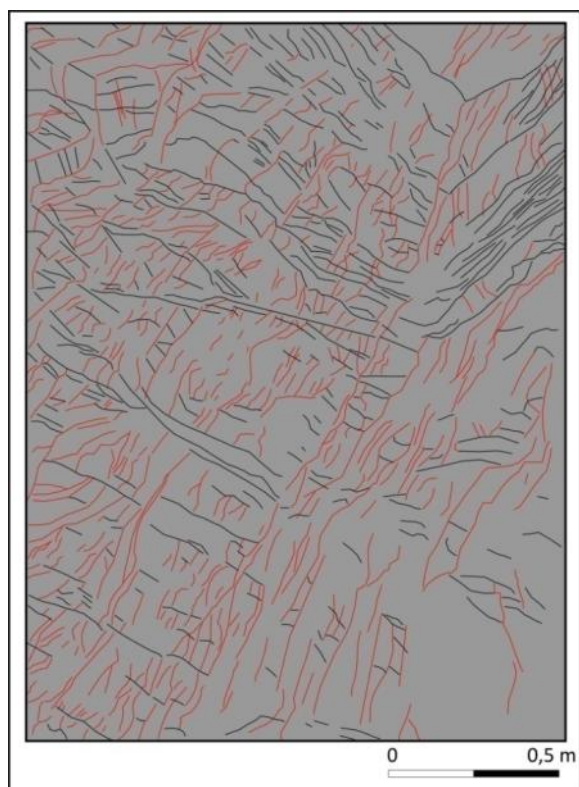




PRILOG 11 (IMG_2117)



PRILOG 12 (IMG_2119)





PRILOG 13 (IMG_2121)

